

**“PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS DE FIOS  
DIAMANTADOS”**

**VALDENIR MOREIRA JUNIOR**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE**

**DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**JUNHO – 2013**

# “PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS DE FIOS DIAMANTADOS”

**VALDENIR MOREIRA JUNIOR**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Orientador: Prof. Marcello Filgueira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
JUNHO – 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**50/2013**

Moreira Junior, Valdenir

Processamento e caracterização de pérolas de fios diamantados /  
Valdenir Moreira Junior. – Campos dos Goytacazes, 2013.

xiv, 166 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) --  
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de  
Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos  
dos Goytacazes, 2013.

Orientador: Marcello Filgueira.

Área de concentração: Materiais de alta dureza.

Bibliografia: f. 141-146.

1. PRENSAGEM A QUENTE 2. PÉROLAS DIAMANTADAS 3.  
ADESÃO COMPÓSITO DIAMANTADO/SUPORTE METÁLICO I.  
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de  
Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título.

CDD 671.33

# “PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS DE FIOS DIAMANTADOS”

**VALDENIR MOREIRA JUNIOR**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Aprovada em 28 de Junho de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. João Telésforo Nóbrega de Medeiros (DSc. Eng. Mecânica) – PPGEM - UFRN

---

Prof. Helion Vargas (DSc. Física) – PPGCN/LCFIS - UENF

---

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro (DSc. Eng. Civil) – PPGECC - UENF

---

Prof. Marcello Filgueira (DSc. Eng. Materiais) – PPGECCM – UENF  
(Orientador)



## DEDICATÓRIA

Ao Senhor Deus eterno, aos meus familiares e amigos,  
pela ajuda e orientação na realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por iluminar meus caminhos, proporcionando-me força e bênçãos, tornando-me capaz para a realização de desafios como este.

À minha Família, por estar presente em todos os momentos, incentivando-me e me proporcionando conforto nas horas difíceis.

Ao professor e orientador Marcello Filgueira, pela sinceridade, ensinamentos, paciência e principalmente pelo exemplo dado durante todo o trabalho, bem como a orientação em todas as etapas.

Aos amigos Luciano Oliveira e Zulmira Guimarães, que me receberam no grupo de pesquisa com muito carinho, se mostrando companheiros em todos os momentos.

Aos amigos, e colegas do grupo de pesquisa, Cássio Carvalho, Cristiane Marinho, Matheus Peçanha, Marcelle Santos, Rogério Bolzan, Humbeto Barroncas, Adriano Vieira, Eliete Toledo e Carla Priscila pela troca de idéias, pela ajuda e agradável companhia na nossa sala de estudos.

Aos meus amigos pelo apoio e paciência, em especial ao amigo Fabrício Bagli pela convivência desde o início deste estudo.

Ao Prof. Dr. Eduardo Atem de Carvalho, responsável pela realização dos ensaios de cisalhamento das minhas amostras.

Ao Prof. Dr. Angelus Giuseppe Pereira da Silva, por permitir que a amiga Zulmira Guimarães realizasse as fotos de MEV de minha dissertação, sempre com boa vontade e disponibilidade.

Ao técnico do Laboratório de Materiais Superduros, Renan da Silva Guimarães, pela ajuda na condução do funcionamento dos equipamentos.

A todos os colegas do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), pelos momentos de aprendizagem.

Aos professores e funcionários do LAMAV, pelo apoio na realização dos ensaios e pelo incentivo diário.

Enfim, a todos os companheiros, funcionários e amigos do LAMAV, pelos momentos de aprendizagem, diversão e cooperação, que, de alguma forma auxiliaram-me no decorrer deste trabalho.

---

---

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	IV
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	XII
<b>RESUMO</b>	XIII
<b>ABSTRACT</b>	XIV

### **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

1.1 - Aspectos Gerais	01
1.2 - Objetivos	02
1.3 - Justificativas	02

### **CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

2.1 - A Indústria do Setor de Rochas Ornamentais no Brasil	04
2.2 - Pérolas de Fios Diamantados	08
2.3 - Seleção da Matriz Metálica.	17
2.4 - Processamento Industrial das Ferramentas Diamantadas Impregnadas	32
2.5 - A Retenção dos Cristais de Diamante	37
2.6 - Mecanismo de Desgaste dos Compósitos Diamantados	41

### **CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS**

3.1 - Apresentação	47
3.2 - Caracterização dos Pós	47
3.3 - Definição da Mistura	49
3.4 - Determinação da Massa por Amostra	50
3.5 - Condição de Sinterização – Prensagem a Quente	52
3.6 - Preparação Metalográfica dos Corpos Sinterizados	54
3.7 - Ensaio de Cisalhamento	54
3.8 - Ensaio de Resistência à Abrasão	55

---

3.9 - Microscopia Eletrônica de Varredura	56
3.10 - Microanálise	57
3.11 - Difração de Raios-X (DRX)	57
3.12 - Espectroscopia de Raios-X (EDX)	57

## **CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

4.1 - Pérolas Diamantadas	58
4.2 - Análise Microestrutural do Compósito Diamantado Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21)	60
4.3 - Espectroscopia de Raios-X (EDX)	64
4.4 - Análise Estrutural	64
4.4.1- Difratoograma da liga Metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21)	65
4.4.2- Difratoograma da liga Metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (Pérola Comercial China)	67
4.4.3- Difratoograma da liga Metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África)	68
4.4.4- Difratoograma da liga Metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)	70
4.5 - Espectrometria por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) das Pérolas Estudadas	72
4.5.1- Compósito diamantado Fe-Cu-Co-Sn (Pérola DIABASE-V21)	73
4.5.2- Compósito diamantado Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (Pérola Comercial China)	78
4.5.3- Compósito diamantado Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul)	83
4.5.4- Compósito diamantado Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)	88
4.6 - Ensaio de Cisalhamento	93
4.7 - Ensaio de Resistência à Abrasão	99
4.8 - Análise Microestrutural do Compósito Diamantado e Pérolas Comerciais Após Ensaio de Resistência à Abrasão	104

---

4.8.1- Compósito diamantado Fe-Cu-Co-Sn (Pérola DIABASE-V21)	104
4.8.2- Compósito diamantado Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (Pérola Comercial China)	115
4.8.3- Compósito diamantado Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul)	124
4.8.4- Compósito diamantado Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)	131
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÃO</b>	<b>139</b>
<b>CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>141</b>
<b>ANEXO</b>	<b>147</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Principais fluxos comerciais de rochas processadas.	05
Figura 2.2 - Exportações mensais do setor de rochas ornamentais.	06
Figura 2.3 - Perfil do diamante em fios com pérolas eletrodepositadas e impregnadas.	10
Figura 2.4 - Pérolas e fios diamantados com sistemas de espaçamento por molas (para corte mármore) e por plástico moldado por injeção (corte de granito).	11
Figura 2.5 - Máquina de corte de fio diamantado.	13
Figura 2.6 - Corte vertical e horizontal com fio diamantado.	14
Figura 2.7 - Morfologia das partículas do pó MasterTec-1.	22
Figura 2.8 - Propriedades do MasterTec-1 e MasterTec-2 (Fe-Co-Ni) processado por prensagem a quente: dureza (HRB) e densidade ( $\text{g/cm}^3$ ).	22
Figura 2.9 - Ensaio de Serragem.	22
Figura 2.10 - Ensaio de resistência ao desgasta das três versões da liga MasterTec.	24
Figura 2.11 - Micrografia da liga MasterTec-1, com adição de 40%p de cobre fino.	24
Figura 2.12 - Curvas de densificação das ligas NEXT Cu-Fe-Co processadas por prensagem a quente.	26
Figura 2.13 - Curvas de dureza HRB das ligas NEXT Cu-Fe-Co processadas por prensagem a quente.	27
Figura 2.14 - Seção isotérmica ( $850^\circ\text{C}$ ) do diagrama de fases ternário das ligas NEXT Cu-Fe-Co.	27
Figura 2.15 - Micrografia da liga NEXT-100 Cu-Fe-Co processada por prensagem a quente ( $T= 700^\circ\text{C}$ , $P= 30\text{MPa}$ , $t= 3$ minutos), mostrando a fase dúctil rica em cobre (contraste branco), fase Fe-Co (em cinza) e óxidos de ferro (em preto).	28
Figura 2.16 - Influência da temperatura de sinterização por prensagem a quente nas propriedades do cobalite 601, cobalite HDR e Cobalite CNF.	30
Figura 2.17 - Dureza e massa específica em função da temperatura de sinterização da liga DIABASE-V21.	31
Figura 2.18 - Rotas industriais de fabricação de ferramentas diamantadas impregnadas.	32
Figura 2.19 - Ciclo de prensagem a quente.	33

- Figura 2.20 - Curvas de prensagem a quente dos pós-comerciais substitutos do cobalto puro. 36
- Figura 2.21 - Diagrama esquemático da distribuição de forças atuantes em um cristal de diamante, embebido em matriz metálica, durante operação de corte: serra diamantada. 38
- Figura 2.22 - Fadiga da matriz metálica ligante predizendo uma eventual falha do cristal de diamante. 39
- Figura 2.23 - Os revestimentos adicionam massa e textura à superfície dos cristais. 41
- Figura 2.24 - Tipos de desgaste sobre os diamantes. 44
- Figura 2.25 - Avaliação do desgaste dos diamantes em usinagem de aço austenítico. 45
- Figura 3.1 - Rota Industrial de processamento dos compósitos diamantados via metalurgia do pó. 47
- Figura 3.2 - Gráfico do tamanho médio de aglomerados do pó pré-ligado DIABASE-V21. 49
- Figura 3.3 - Desenha esquemático das Partes de uma pérola diamantada, produzida por este trabalho. 51
- Figura 3.4 - Matriz de sinterização utilizado na prensagem a quente. 52
- Figura 3.5 - Abrasímetro especial modificado microprocessado. 55
- Figura 4.1 - Pérolas Diamantadas Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), produzidas por este estudo. 59
- Figura 4.2 - Aspecto dimensional das pérolas produzidas por este trabalho com a liga metálica DIABASE-V21 (escala em mm). 59
- Figura 4.3 - Distribuição dos cristais de diamante na matriz ligante Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21) após ensaio de Resistência à abrasão, durante 2 minutos. 61
- Figura 4.4 - Desgaste do compósito DIABASE-V21 e surgimento de diamantes com diferentes tamanhos de área exposta, após 6 minutos de ensaio. 61
- Figura 4.5 - Micrografia do diamante clivado (quebrado) do compósito DIABASE-V21, após 2 minutos de ensaio de desgaste por abrasão. 62
- Figura 4.6 - Micrografia mostrando vários estágios de desgaste do compósito diamantado DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão. 63
- Figura 4.7 - Difratograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada processada com a liga DIABASE-V21 por prensagem a quente ( $T= 800^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 35\text{MPa}$ ,  $t= 3$  minutos). 66



- Figura 4.8 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial China. 68
- Figura 4.9 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial África do Sul. 70
- Figura 4.10 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial Itália. 72
- Figura 4.11 - Microestrutura da liga Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), com identificação da região da microanálise pontual por EDS. 73
- Figura 4.12 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 01(Figura 4.11). 74
- Figura 4.13 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 02 (Figura 4.11). 74
- Figura 4.14 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 03 (Figura 4.11). 75
- Figura 4.15 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 04 (Figura 4.11). 75
- Figura 4.16 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (Diabase-V21). 76
- Figura 4.17 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21). 77
- Figura 4.18 - Microestrutura da Liga Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), com identificação da região da microanálise por EDS. 78
- Figura 4.19 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 01 (Figura 4.18). 79
- Figura 4.20 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 02 (Figura 4.18). 79
- Figura 4.21 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 03 (Figura 4.18). 80
- Figura 4.22 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 04 (Figura 4.18). 80
- Figura 4.23 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China). 81
- Figura 4.24 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China). 82
- Figura 4.25 - Microestrutura da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul) com identificação da região da microanálise por EDS. 83

- Figura 4.26 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 01 (Figura 4.25). 84
- Figura 4.27 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 02 (Figura 4.25). 84
- Figura 4.28 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 03 (Figura 4.25). 85
- Figura 4.29 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 04 (Figura 4.25). 85
- Figura 4.30 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul). 86
- Figura 4.31 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul). 87
- Figura 4.32 - Microestrutura da Liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), com identificação da região da microanálise por EDS. 88
- Figura 4.33 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 01 (Figura 4.32). 89
- Figura 4.34 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 02 (Figura 4.32). 89
- Figura 4.35 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 03 (Figura 4.32). 90
- Figura 4.36 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 04 (Figura 4.32). 90
- Figura 4.37 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália). 91
- Figura 4.38 - Mapeamento por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália). 92
- Figura 4.39 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento da pérola diamantada DIABASE-V21. 93
- Figura 4.40 - Gráfico de força versus deslocamento dos compósitos diamantados das pérolas produzidas por este trabalho com a liga metálica DIABASE-V21. 95
- Figura 4.41 - Micrografia realizada após ensaio de cisalhamento da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante, sinterizada em tubo metálico com canais. 97

- Figura 4.42 - Micrografia mostrando os cristais de diamante após ensaio de 97  
cisalhamento da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante, sinterizada em tubo  
metálico com canais.
- Figura 4.43 - Micrografia mostrando o compósito da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante 98  
após ensaio de cisalhamento, sinterizada em tubo metálico com  
canais.
- Figura 4.44 - Micrografia realizada após ensaio de cisalhamento mostrando adesão 99  
do Compósito diamantado da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante no tubo  
metálico sem canais.
- Figura 4.45 - Gráfico de resistência à abrasão versus tempo das pérolas 102  
diamantadas.
- Figura 4.46 - Distribuição dos cristais de diamantes do compósito DIABASE-V21, 105  
após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.47 - Distribuição dos cristais de diamantes do compósito DIABASE-V21, 106  
após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.48 - Distribuição dos cristais de diamante do compósito DIABASE-V21, 106  
após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.49 - Morfologia de um diamante no compósito DIABASE- V21, após 2 107  
minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.50 - Clivagem por impacto do cristal de diamante no compósito 108  
DIABASE-V21, após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.51 - Cristal de diamante de tamanho médio com evidência de dano, após 2 108  
minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.52 - Evidências da clivagem do cristal de diamante do compósito 110  
DIABASE-V21, após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.53 - Morfologia do cristal de diamante na matriz ligante de DIABASE-V21, 110  
após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.54 - Cristal de diamante no compósito DIABASE-V21, surgindo como nova 111  
face cortante para dar continuidade ao corte, após 6 minutos de  
ensaio de abrasão.
- Figura 4.55 - Morfologia de cristais desgastados de diamante no compósito 113  
DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.56 - Evidências de desgaste abrasivo por formação de proa antes do 113  
destacamento do cristal de diamante do compósito de DIABASE-V21,  
após 12 minutos de ensaio de abrasão.

- Figura 4.57 - Morfologia de clivagem do cristal de diamante no compósito DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão. 114
- Figura 4.58 - Morfologia de desgaste abrasivo do compósito DIABASE-V21, com fechamento de pull-out, após 12 minutos de ensaio de abrasão. 114
- Figura 4.59 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão. 116
- Figura 4.60 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão. 116
- Figura 4.61 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão. 117
- Figura 4.62 - Estrutura do diamante “pull-out” na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão. 118
- Figura 4.63 - Estrutura dos cristais de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão. 118
- Figura 4.64 - Micrografia mostrando a clivagem de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão. 119
- Figura 4.65 - Morfologia do desgaste abrasivo por destacamento do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China) após 6 minutos de ensaio de abrasão. 120
- Figura 4.66 - Estrutura do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão. 120
- Figura 4.67 - Morfologia do desgaste por clivagem do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão. 121
- Figura 4.68 - Morfologia do desgaste de cristais de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão. 122
- Figura 4.69 - Morfologia do desgaste por destacamento do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão. 122

- Figura 4.70 - Morfologia do desgaste do cristal de diamante na matriz metálica 123 Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.71 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 125 metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.72 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 125 metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.73 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 126 metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.74 - Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica 127 Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.75 - Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica 127 Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.76 - Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na 128 matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.77 - Morfologia do desgaste por clivagem de diamantes na matriz metálica 129 Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.78 - Desgaste evidenciando a falha na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni 129 (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.79 - Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na 130 matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.80 - Morfologia do desgaste por clivagem dos diamantes na matriz 131 metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

- Figura 4.81 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 132 metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.82 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 132 metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.83 - Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz 133 metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.84 - Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na 134 matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.85 - Morfologia do desgaste por destacamento do cristal de diamante na 134 matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.86 - Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica 135 Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.87 - Morfologia do desgaste e evidenciando o “gap” entre o diamante e a 136 matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.88 - Deformação da matriz ligante. Figura: (a) deformação elástica; (b) 137 deformação plástica.
- Figura 4.89 - Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica 137 Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.
- Figura 4.90 - Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica 138 Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Resultados de corte com os fios impregnados e eletrodepositados, para alguns tipos de mármore.	12
Tabela 2.2 - Parâmetros técnicos usados em corte de rochas graníticas.	15
Tabela 2.3 - Fatores que afetam a eficiência do corte com o fio diamantado.	16
Tabela 2.4 - Comparação das propriedades da liga MasterTec com o pó de cobalto E.F.	21
Tabela 2.5 - Comparação das propriedades das três ligas MasterTec.	24
Tabela 2.6 - Mudança na propriedade tecnológica do MasterTec-1, com adição de 40%p de cobre.	25
Tabela 2.7 - Composição química (% em peso) das ligas NEXT Cu-Fe-Co.	25
Tabela 2.8 - Composição das ligas Cobalite 601, Cobalite HDR, Cobalite CNF e propriedades de processamento.	29
Tabela 2.9 - Composição aproximada dos ligantes DIABASE.	31
Tabela 2.10 - Concentração versus densidade de diamantes em ferramentas de corte.	34
Tabela 3.1 - Análise química do pó pré-ligado DIABASE-V21 (fabricado por processo hidrometalúrgico – Dr. FRITSCH) – % em peso.	48
Tabela 3.2 - Tamanho médio de aglomerados do pó pré-ligado DIABASE-V21.	48
Tabela 3.3 - Dados dimensionais da pérola de fio diamantado.	51
Tabela 4.1 - Resultados de análise química da matriz ligante das pérolas comerciais, obtidos via EDX.	64
Tabela 4.2 - Resistência à Abrasão das pérolas diamantadas.	100

## RESUMO

O corte de materiais não metálicos, frágeis e duros, tais como cerâmicos, rochas, concretos, requer a utilização de ferramentas diamantadas. Os fios diamantados são ferramentas de corte composta de um cabo de aço inoxidável, sobre o qual são montadas as pérolas diamantadas, para aplicação de desmonte de rochas ornamentais. Devido à grande importância para indústria, o estudo de processamento deste tipo de ferramenta demonstra-se de grande relevância para o desenvolvimento tecnológico e científico, devido ao fato de serem geralmente importadas. No presente trabalho, tratou-se do processamento de pérolas de fios diamantados segundo a rota industrial da metalurgia do pó: mistura, prensagem a quente a 35MPa/800°C/3 minutos. Para tal, utiliza-se pó comercial da liga ferrítica DIABASE-V21 e cristais de diamantes de alta qualidade, tamanho de grão médio de 425µm. As pérolas foram caracterizadas através microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X, espectrometria por dispersão de energia (EDS), espectroscopia de raios-X (EDX), ensaio de cisalhamento para verificar a adesão compósito diamantado/suporte metálico, bem como são feitos ensaios de abrasão em simulador físico, com ênfase na evolução do processo de desgaste dos compósitos diamantados produzidos por este estudo para tempos acumulados de 2 a 12 minutos e confrontando com pérolas comerciais importadas. Os resultados indicam que é possível produzir pérolas de fios diamantados de boa qualidade, atingindo uma resistência ao desgaste da mesma ordem de algumas pérolas importadas.

Palavras-Chaves: prensagem a quente - pérolas diamantadas – adesão compósito diamantado/suporte metálico.



**ABSTRACT**

The cutting of non-metallic materials, brittle and hard ceramics such as rocks and concrete, requires the use of diamond tools. The diamond wires are cutting tools, composed of a stainless steel cable, on which are mounted diamond beads for slabbing of ornamental rocks. Owing to the great importance to the industry, the study of processing of this kind of tool demonstrates the great relevance to the technological and scientific development, due to the fact that it is usually imported. In this present work, was treated the processing of diamond wire beads, according to the industrial route of powder metallurgy: mixture of powders, and hot pressing at 35MPa/800°C/3 minutes. For such, the used commercial powder was the ferritic alloy diabase V21 and crystals of diamonds of high quality, average grain size of 425µm. The processed beads were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction, X-ray energy dispersive spectrometry (EDS), X-ray spectroscopy (EDX) and shear test to verify the adhesion of diamond composites/metallic support, as well as abrasion tests were also performed, using a physical simulator, with emphasis on the evolution of wear process of the diamond beads produced by this study, during accumulated times of 2-12 minutes and comparing with imported beads. The results indicate that it is possible to produce diamond beads of good quality, achieving a wear resistance of the same order of some imported beads.

Key Words: hot pressing - diamond beads - grip

---

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

### 1.1 – Aspectos Gerais

Nas diferentes áreas de aplicação, o uso e substituição de alguns tipos de ferramentas por ferramentas diamantadas é crescente. Os compósitos diamantados sinterizados são muito efetivos quando do seu uso para processar materiais não metálicos, frágeis e duros, tais como cerâmicas, rochas, concreto, vidro etc [Yamaguchi et al.,1997].

Atualmente, as ferramentas diamantadas empregadas para o corte de rochas ornamentais são compósitos constituídos de partículas de diamante embebidas numa matriz metálica ligante. Esses materiais são normalmente produzidos em grande escala pelas técnicas da Metalurgia do Pó e abrangem uma larga escala de aplicações, como processamento de rochas, engenharia civil, etc.

Nos dias atuais, a maioria destas ferramentas é produzida pela tradicional rota de prensagem a quente, que pode ser finalizada por infiltração metálica em alguns casos, mas também algumas destas ferramentas são produzidas por prensagem a frio e sinterização convencional. Durante o processo, as partículas de diamante são ligadas à matriz metálica por uma combinação de interações químicas e físicas e se faz necessário um rígido controle dos parâmetros de processamento para evitar ataque, dissolução e/ou grafitização do diamante, o que pode afetar o desempenho final do corte [Yamaguchi et al.,1997; Oliveira e Filgueira, 2007].

A escolha da matriz metálica adequada, no processo de fabricação de ferramenta diamantada, é um aspecto desafiador, pois de sua escolha depende da abrasividade do material a ser cortado. Para atender o bom rendimento das ferramentas impregnadas, o metal ligante deve ter uma boa compatibilidade química e mecânica com o diamante, sendo capaz de segura-lo durante o corte [Artini et al., 2011].

A seleção do tipo, forma, tamanho e distribuição dos diamantes é importante para se alcançar elevada capacidade de corte. Entretanto, o processo de desgaste da matriz ligante também é fato marcante, já que é responsável direto pelo corte.

Face à grande demanda de utilização das ferramentas diamantadas, atualmente é crescente a busca e o desenvolvimento de novas linhas de pesquisas voltadas para desenvolvimento tecnológico da produção de ferramentas

diamantadas de corte com melhores propriedades, como resistência ao desgaste e capacidade elevada de corte.

## **I.2 – Objetivos**

O principal objetivo desta proposta é o processamento e caracterização de pérolas de fios diamantados feitas à base do sistema Fe-Cu-Co-Sn-Diamante.

São apresentados abaixo alguns objetivos específicos desta proposta:

- Avaliar quantitativamente o desgaste por abrasão das pérolas diamantadas produzidas por esta proposta, usando o pó comercial DIABASE-V21 (Fe-Cu-Co-Sn);
- Estudar a evolução do processo de desgaste das pérolas diamantados Fe-Cu-Co-Sn-diamante, produzidas por esta proposta, em confronto com pérolas comerciais (importadas);
- Identificar as fases cristalinas presentes na liga Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21) e nas pérolas diamantadas comerciais;
- Avaliar a adesão do compósito diamantado/tubo metálico.

## **I.3 – Justificativas**

O Brasil é um país tipicamente importador de ferramentas diamantadas, em especial, de fios de pérolas diamantadas. Desta forma, torna-se necessário desenvolver pesquisas para o desenvolvimento tecnológico e científico dos vários tipos de ferramentas diamantadas.

Aliado a isto, cada rocha ornamental tem suas propriedades e, por esta razão, não é todo tipo de ferramenta que pode ser utilizada com sucesso no corte de rochas específicas, sendo necessário o desenvolvimento tecnológico da própria produção destas pérolas diamantadas, que sejam fortemente baseadas em pesquisas próprias. Assim, acredita-se que a nacionalização da produção de pérolas diamantadas proporcionará uma redução dos custos de corte da rocha, aumentando, então, o lucro e/ou a venda.

Em face à grande demanda de ferramentas diamantadas e da exploração de rochas ornamentais no Brasil, faz-se necessário o desenvolvimento local de

---

tecnologia de manufatura e produção destas ferramentas. O Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), através do Setor de Materiais Super Duros (SMSD), possui equipe capacitada ao desenvolvimento tecnológico de ferramentas diamantadas, ao estudo científico nas várias etapas de processamento, caracterização e ensaios destas ferramentas.

## **CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 – A Indústria do Setor de Rochas Ornamentais no Brasil**

A indústria extrativa mineral é bastante diversificada. A mineração foi historicamente um fator de atração populacional e um vetor para o desenvolvimento regional, pois o impacto econômico cresce na medida em que são identificadas minas em regiões de pouca atividade produtiva em locais de baixa densidade demográfica.

No cenário mundial, a Itália coloca-se entre os maiores produtores, maior importadora de matéria prima, maior consumidora per capita e maior exportadora de rochas, bens de capital e tecnologia, tendo sido responsável pelas inúmeras transações de máquinas e equipamentos, no mercado internacional. Os EUA, seguidos pelo Japão são, por sua vez, os principais importadores de produtos acabados, respondendo significadamente pela maior parcela das transações internacionais. A China é considerada a maior importadora de máquinas e equipamentos [Abirochas, 2011].

A produção mundial de rochas ornamentais é influenciada de forma marcante pelo avanço tecnológico, contribuindo para uma produção de larga escala. Os países desenvolvidos que, além de terem tradição nos métodos de extração e beneficiamento, são responsáveis pela fabricação de equipamentos sofisticados, melhorando a qualidade dos produtos processados, causando menos impacto ambiental e tendo maior aproveitamento mineral.

Cerca de 70% da produção mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% é desdobrada em peças para arte funerária, 10% para obras estruturais e 5% para outros campos de aplicações. O consumo de rochas é estimado em 600 milhões de m<sup>2</sup>/ano. Os produtos cerâmicos, com um consumo de 3,8 bilhões de m<sup>2</sup>/ano, são seus principais concorrentes na construção civil [Abirochas, 2011].

As rochas ornamentais de revestimento têm valor comercial muito significativo, quando comparado aos materiais cerâmicos. Do ponto de vista comercial, as rochas são classificadas como granitos (Ígnea e Metamórfica) e mármore (Metamórfica originada do calcário). O processamento de blocos, chapas e ladrilhos requer a utilização de ferramenta diamantada, tais como discos, serras, brocas, pérolas, sapatas diamantadas etc.

Segundo a ABIROCHAS [2011], no mercado consumidor mundial, destacam-se a Alemanha, a Espanha, os Estados Unidos, a França, a Grécia, a Itália e o Japão, que foram responsáveis por 40% do consumo de rochas ornamentais, como mostra a Figura 2.1. A Europa Central é a região com maior demanda, seguida pela América do Norte, representada pelos Estados Unidos. Esses países são extremamente rigorosos quanto à qualidade do produto.

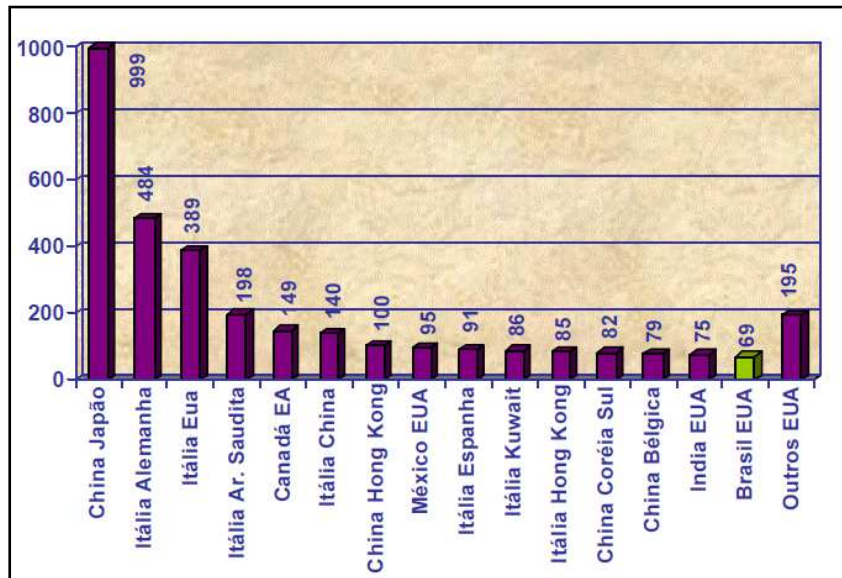


Figura 2.1 – Principais fluxos comerciais de rochas processadas (Toneladas x1000) – posição 68.02 – 1999. [ABIROCHAS, 2011].

Os países citados na Figura 2.1, podem ser classificados de acordo com as atividades deste segmento:

- Principais produtores: Brasil, Índia, África do Sul, China;
- Principais consumidores: Japão, Estados Unidos, Alemanha, Arábia Saudita;
- Realização atividades como produtores e consumidores: Itália, Espanha, França, Grécia, Holanda, Finlândia.

No Brasil as atividades do setor de rochas ornamentais estão distribuídas por diversos Estados brasileiros, tendo uma maior concentração das empresas na região sudeste e nordeste, onde estão localizadas as jazidas de diversos tipos de mármore e granitos exóticos. O país conta com equipamentos de qualidade para exploração, desdobramento e beneficiamento, sendo capaz de competir no mercado mundial [ABIROCHAS, 2011].

As atividades de exploração e comercialização de rochas ornamentais no Brasil empregam 105 mil pessoas de forma direta, nas 10 mil empresas existentes. A capacidade de produção é de US\$ 2,1 bilhões por ano, incluindo a comercialização no mercado interno e externo, a compra de equipamentos, insumos e outros serviços. [SEBRAE, 2011].

No ano de 2011, as exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento totalizaram US\$ 999,65 milhões, correspondentes a um volume físico comercializado de 2.188.929,59 toneladas. As rochas processadas compuseram 74,6% do faturamento e 45,3% do volume físico dessas exportações. Frente ao ano de 2010, registrou-se variação positiva de 4,22% no faturamento, com recuo de 2,26% no volume físico das exportações. Desta forma, pelo menos em 2011, foi pouco significativo o impacto da crise econômica dos países da zona do euro, para as exportações brasileiras de rochas. Espera-se o mesmo para 2012, até pela já percebida recuperação dos EUA e expectativa de estabilidade da economia chinesa [Abirochas, 2012].

As exportações de 2012 deverão situar-se no mesmo patamar daquelas de 2011 (Figura 2.2), segundo o que se pode deduzir do quadro projetado para a economia mundial, e, principalmente, da situação dos mercados dos EUA e China. Pode-se esperar uma variação de até 5% nas exportações, para mais ou para menos, com o dólar não caindo abaixo de R\$ 1,80 [ABIROCHAS, 2012].

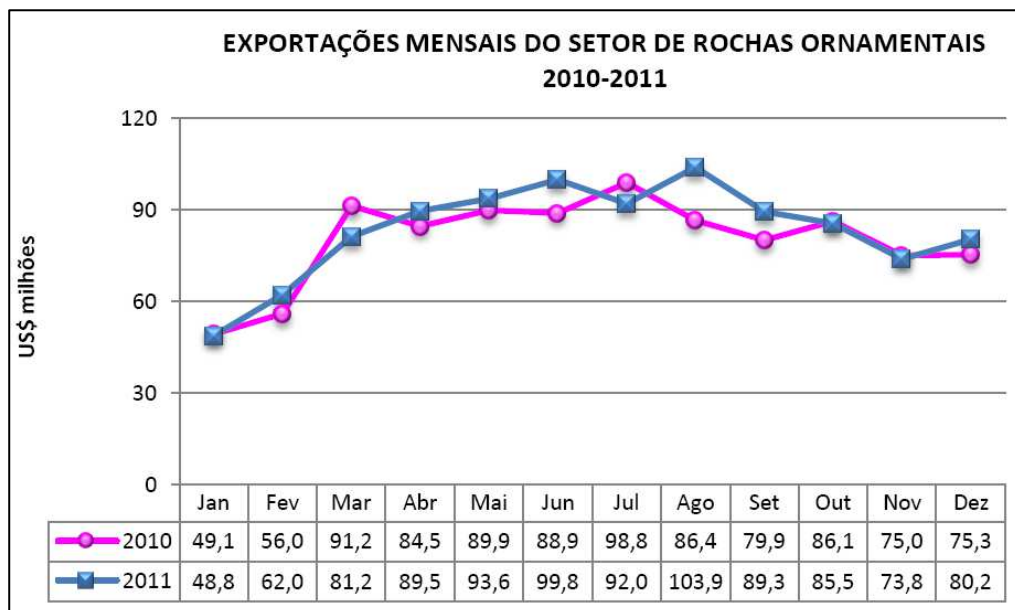


Figura 2.2– Exportações mensais do setor de rochas ornamentais [Abirochas, 2012].

O quadro setorial brasileiro pode ser ilustrado pela produção de 500 variedades comerciais de rochas, entre granitos, mármore, ardósias, quartzitos, travertinos, pedra sabão, basaltos, serpentinitos, conglomerados, pedra talco e materiais do tipo pedra Miracema, pedra Cariri e pedra Morisca, derivadas de quase 1.300 frentes de lavra. Os granitos perfazem cerca de 60% da produção brasileira, enquanto 20% são relativos a mármore e travertinos e quase 8% a ardósias [Abirochas, 2011].

Segundo a ABIROCHAS [2011], os principais estados exportadores brasileiros são Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Rio de Janeiro. O Estado do Espírito Santo apresenta-se como um dos maiores produtores de rochas ornamentais do Brasil. É responsável por aproximadamente metade da produção nacional. Atividades produtivas de extração e beneficiamento estão presentes em grande parte dos municípios capixabas, destacando-se um conjunto de municípios na região noroeste e outro na região sul. Estes dois pólos apresentam elevado grau de integração, onde ocorrem as feiras internacionais do setor de rochas ornamentais.

Como já mencionado anteriormente, na região sul do Espírito Santo se encontra o maior pólo de processamento de rochas ornamentais do País. A cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES é hoje, sobretudo um centro de extrativismo e beneficiamento mineral de mármore, granito e moagem de calcário, integrando várias cadeias produtivas, com destaque para indústria de insumos, máquinas e equipamentos. Obviamente este setor consome largamente ferramentas diamantadas.

Conforme Oliveira, H.C.P [2010], o estado do Rio de Janeiro apresenta uma forte atividade de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais, em especial, nas regiões Norte e Noroeste do Estado, onde se destacam Santo Antônio de Pádua (granito), Italva (mármore) e Campos dos Goytacazes (mármore e granito).

Um novo paradigma no processo de desdobramento (serragem) de chapas são os teares multifio diamantados. Cerca de vinte e cinco desses novos equipamentos foram instalados no Espírito Santo, e cinco em outros Estados brasileiros. Estima-se que mais quinze tenham sido já adquiridos, e deverão ser instalados em um horizonte de seis meses. As máquinas multifios apresentam um rendimento satisfatório, no quesito produtividade ( $m^3/h$ ), tendo, com isso um desempenho superior aos equipamentos multilâminas. Dessa forma, tem se



pesquisado para melhoria dos fios diamantados atualmente oferecidos no mercado, quanto à sua vida útil durante o trabalho de corte e velocidade de corte [Abirochas, 2011].

Os teares multifios apresentam maior produtividade de chapas por metro cúbico, menor consumo de energia, menor impacto ambiental, menor custo de mão-de-obra. São particularmente recomendados e necessários para o desdobramento de materiais mais abrasivos e/ou frágeis e heterogêneos.

## **2.2 - Pérolas de Fios Diamantados**

As pérolas de fios diamantados são segmentos anulares de diâmetro externo de 10 a 12 mm, diâmetro interno de 7 mm e espessura de parede de 2,5 mm. São montadas com espaçamento aproximado de 25 mm sobre um cabo multifilamentar de aço inoxidável AISI 316, sobre a qual são colocadas pérolas diamantadas (matriz metálica + diamante), separadas por anéis de borracha e/ou molas. Este conjunto compõe os fios diamantados, que são ferramentas de corte aplicadas ao desmonte de rochas ornamentais, tais como os mármore e os granitos, bem como a cortes de blocos de concreto e, podem ser usadas em substituição às serras em geral. As pérolas diamantadas são as partes mais importantes da ferramenta, pois por serem feitas à base de um compósito diamantado, são as responsáveis pela ação de corte [Filgueira e Pinatti, 2002; Oliveira e Filgueira, 2008].

Devido às complexas condições de operações nas quais as ferramentas são expostas, o corte de rocha e concreto armado com fio diamantado possui as mesmas vantagens que a realização do corte com disco diamantado. No entanto, com o recurso ao fio diamantado, não há limitações em profundidade de corte, o espaço não é uma limitação, não existe a necessidade de realizar outros cortes nas esquinas e o acabamento é muito preciso e liso, emite baixo ruído e vibrações, a preparação e montagem são rápidas e permitem realizar cortes curvos ou circulares com grande eficácia [Costa, 2009].

Nos dias atuais, a maioria das ferramentas diamantadas é produzida pela tradicional rota de prensagem a quente, que pode ser finalizada por infiltração metálica em alguns casos, mas também algumas destas ferramentas são produzidas por prensagem a frio e sinterização. Durante o processo, as partículas de diamante

são ligadas à matriz metálica por uma combinação de interações químicas e físicas e se faz necessário um rígido controle dos parâmetros de processamento (temperatura e pressão) para evitar ataque, dissolução e/ou grafitização do diamante, o que pode afetar o desempenho final do corte [Filgueira e Pinatti, 2002; Oliveira et al., 2007].

Os diamantes utilizados no processamento de pérolas diamantadas são de alta qualidade, granulometria e concentração requerida para cada tipo de aplicação considerando também os tipos de materiais ligantes. Estes diamantes apresentam elevada condutividade térmica, tenacidade e dureza. O tamanho das partículas de diamante é de aproximadamente 40/50 mesh (425-300 $\mu$ m) [Filgueira e Pinatti, 2001; Oliveira e Filgueira, 2008].

As pérolas diamantadas à base de diamantes impregnados são fabricadas via Metalurgia do Pó, onde a primeira etapa consiste da mistura do pó de diamante com o pó de metal ligante – geralmente tungstênio, cobalto, cobalto-bronze, ferro-cobalto – para formar o compósito diamantado [Daniel, 1995; Filgueira and Pinatti, 2003; Oliveira e Filgueira, 2008]. Na rota de obtenção das pérolas diamantadas via Metalurgia do Pó convencional, após a etapa inicial de mistura dos pós, procede-se com a prensagem uniaxial ou isostática a frio da mistura, obtendo um corpo “verde” de dimensões próximas à da futura pérola. Procede-se, então, com a sinterização, a qual garantirá a consolidação do corpo verde, e a obtenção de um volume anular (pérola) diamantado [Przyklenk, 1993]. Na rota de prensagem a quente, após a etapa de mistura, esta é vertida através de um dosador, dentro de orifícios de uma matriz, onde a mistura é prensada concomitantemente assistida por temperatura, ocorrendo a sinterização [Urakawa et al, 2000].

Os fios diamantados com pérolas impregnadas caracterizam-se por uma taxa de corte constante, pois a abrasão da matriz metálica (ligante) faz com que surjam sempre novas faces cortantes de diamantes. Pode-se também observar que os fios com pérolas impregnadas apresentam rendimentos da ordem de 2 vezes superior aos fios com pérolas eletrodepositadas, conforme Figura 2.3. A velocidade linear de corte em mármore varia de 20 a 40m/s, dependendo do tipo de mármore [Hawkins, 1990].

Os fios com pérolas eletrodepositadas caracterizam-se por uma taxa de corte inicialmente alta e diminui até valores baixos. Deve-se isto ao fato que durante a operação de corte, a abrasão entre a pedra e o diamante faz surgir superfícies de

desgaste nos cristais de diamante, salientando-se que neste tipo de pérola existe apenas uma camada de diamante [Hawkins, 1990]. Este processo eletrolítico resulta da formação de uma única camada de diamante, no qual os cristais de diamante são inseridos na célula eletrolítica e posteriormente depositados em tubos montados sobre o anodo. Normalmente, o eletrólito consiste de alguma solução de sulfato em água e o cátodo é formado de Níquel, cuja função é aderir ou se comportar como matriz para os cristais de diamante na deposição para formar a monocamada.

Os fios diamantados com pérolas eletrodepositadas são os mais adequados para cortes de rochas de baixa dureza e em pequenos cortes, devido ao fato dos diamantes se apresentarem mais protuberantes e, portanto, cortam de maneira mais eficaz, mesmo que a um maior taxa de desgaste. A velocidade de corte utilizada neste tipo de ferramenta decresce regularmente com o tempo e, em função do tipo de aplicação, permite a utilização de máquinas de baixa potência (25 cv) e uma refrigeração reduzida (entre 10 a 20 Litros/Minutos) [Regadas, 2006].

É comum, no corte de mármore, o uso de fios diamantados com pérolas eletrodepositadas, com espaçadores de molas, embora seja notório o aumento do uso de fios diamantados com pérolas impregnadas, devido ao custo mais baixo e rendimento mais elevado. O número de pérolas se situa na faixa de 27 a 32 pérolas por metro linear de fio [Trancu, 1980; Hawkins, 1990; Daniel, 1993].

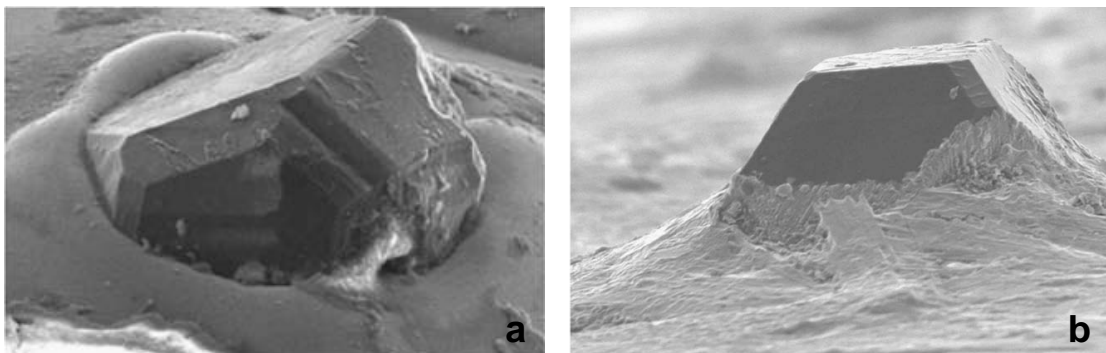


Figura 2.3 – Perfil do diamante em fios com pérolas eletrodepositadas (a) e impregnadas (b) [Sung et al., 2009].

Como já mencionado, no corte de mármore é comum o uso de fios diamantados com sistema de espaçamento de molas, pois o mármore é uma rocha macia e mais fácil de cortar que o granito. Entretanto, esta tecnologia não pode ser utilizada para o corte do granito, devido à sua natureza mais abrasiva, de forma que durante a operação de corte, a lama abrasiva (água refrigerante e cavaco de granito)

se infiltra entre as molas e no espaçamento entre as pérolas e fio, ocasionando desgaste excessivo do cabo de aço e da superfície interna das pérolas, causando dois problemas:

- a) falha prematura do cabo (alma) de aço e;
- b) impossibilidade de se reutilizar as pérolas, cuja superfície interna esteja fora da dimensão original [Hawkins, 1990; Daniel, 1993].

No sistema de espaçamento com plástico, as pérolas são colocadas no fio e, então, o arranjo é colocado em um molde, no qual o plástico é injetado de forma a preencher os intervalos entre as pérolas e o fio. O plástico, além de funcionar como espaçador, também evita a erosão do cabo de aço, causada pela lama abrasiva, de modo que o corte possa ser realizado sem que haja desgaste excessivo do fio alma [Pinzari, 1989; Hawkins, 1990; Daniel, 1993]. Os sistemas de espaçamento com molas e com plástico é mostrado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Pérolas e fios diamantados com sistemas de espaçamento por molas (para corte mármore) e por plástico moldado por injeção (corte de granito) [Sung et al., 2009].

A Tabela 2.1 mostra os resultados típicos de corte com dois tipos de fios diamantados em alguns tipos de mármore. Pode-se observar que o rendimento dos fios diamantados é fortemente influenciado pela dureza do mármore a ser cortado, o que vem a refletir diretamente no custo do corte. Pode-se também observar que,

independentemente do tipo de mármore a ser cortado, os fios de diamantes impregnados apresentam o rendimento da ordem de 40% superior que o dos fios de diamantes eletrodepositados. O custo da operação de corte com fios diamantados impregnados é da ordem de 35% menor que o do fio eletrodepositado, daí a razão pela qual os fios diamantados eletrodepositados estão cada vez mais em desuso. No corte do granito, são sempre empregados fios com pérolas impregnadas, as quais são espaçadas da ordem de 25 mm, o que permite montar 30 a 40 pérolas por metro linear de fio [Hawkins, 1990].

Tabela 2.1 – Resultados de corte com fios impregnados e eletrodepositados, para alguns tipos de mármore [Thoreau, 1984].

Rocha Cortada	Dureza	Fios eletrodepositados		Fios impregnados (Metalurgia do Pó)	
	(Shore)	rendimento <sup>(a)</sup> (m <sup>2</sup> )	custo do corte <sup>(b)</sup> (U\$/m <sup>2</sup> )	rendimento <sup>(a)</sup> (m <sup>2</sup> )	custo do corte <sup>(b)</sup> (U\$/m <sup>2</sup> )
Mármore Carrara	50	500	6,12	800	4,24
Pedra Azul Belga	60	300	10,21	500	6,78
Mármore Irlandês	60	300	10,21	500	6,78
Mármore Kavala (Grécia)	44	600	5,10	1000	3,40
Mármore Perlato (Sicília)	60	-	-	600	5,66

(a)- O rendimento é dado em metro quadrado de rocha cortada por 30 metros de fios diamantados.

(b)- O custo do corte é preço da tecnologia de fios diamantados pelo metro quadrado de rocha cortada.

O arranjo típico de uma máquina de fio diamantado consiste de uma polia acoplada a um motor, montada em trilhos fixos no chão. Com este sistema, duas roldanas guias montadas na trajetória do corte, para gerar o contato necessário do comprimento do fio com a polia e reduzir a oscilação do fio [Hawkins, 1990]. A oscilação pode ser medida através de sensores fixados próximo à polia nas direções X, Y e Z (Figura 2.5), pois a vibração causa desgaste no fio diamantado e rompimento do cabo de aço.

No corte de rochas ornamentais com fio diamantado, o primeiro passo para um corte vertical (tipo mais comum de corte em pedreiras de rochas ornamentais) é realizar dois furos na rocha, um vertical e outro horizontal, que se interceptem a  $90^{\circ}$ . O fio diamantado é passado por dentro dos furos e montado na polia, com suas duas pontas fixas por uma junta de cobre. A máquina anda sobre os trilhos, de forma que a polia tensiona o fio diamantado mediante carga de 120 a 300 kgf e, ao mesmo tempo, faz com que este último gire, iniciando a operação de corte conforme mostra a Figura 2.6 [Hawkins, 1990; Daniel, 1993].

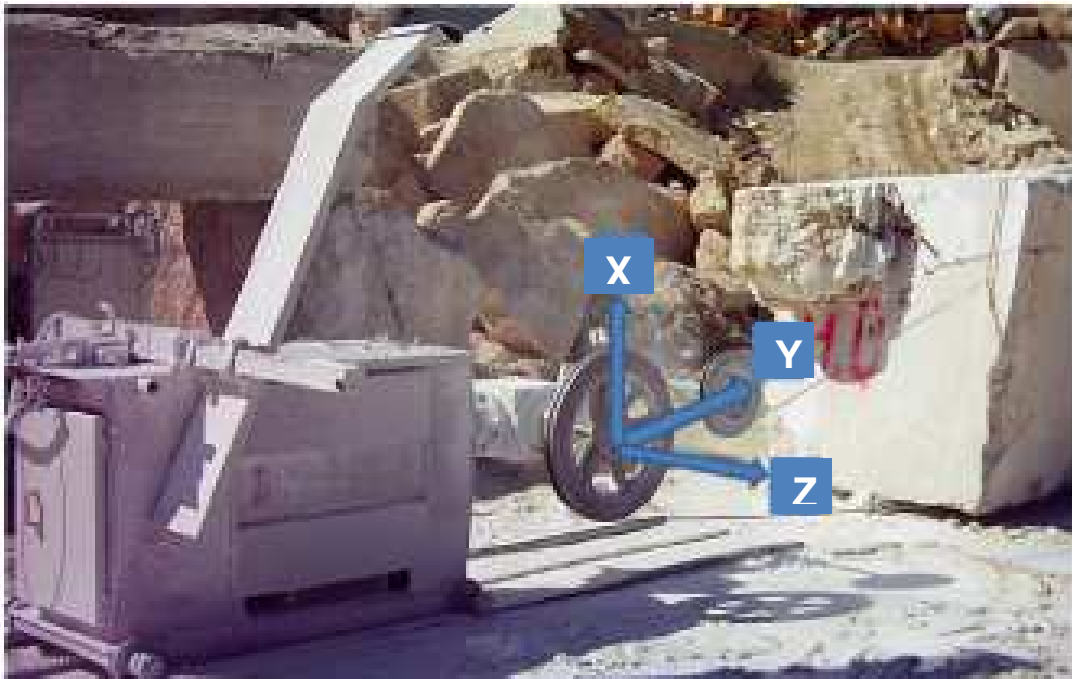


Figura 2.5 – Máquina de corte de fio diamantado [Ozcelik and Yilmazkaya 2011].

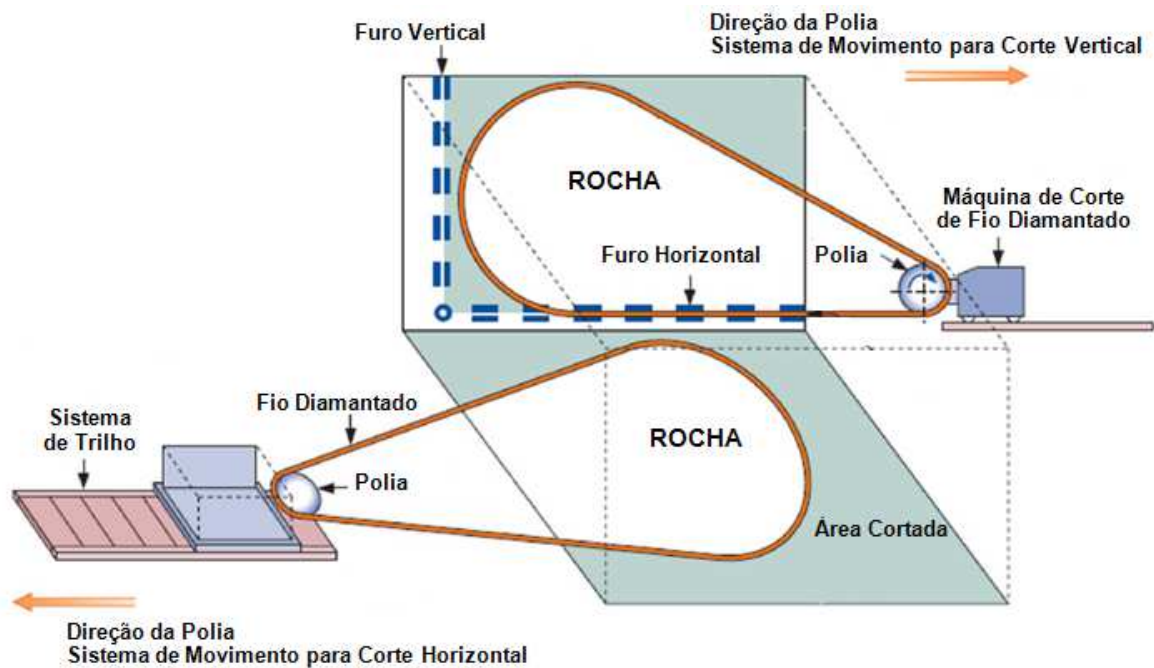


Figura 2.6 - Corte vertical e horizontal com fio diamantado [Ozcelik and Yilmazkaya 2011].

As características de resistência ao desgaste da matriz metálica usada no processamento de pérola diamantada são muito importantes para otimizar o corte e, conseqüentemente, aumentar a produtividade e a vida útil da ferramenta, reduzindo custos operacionais.

Os fatores que influenciam o rendimento de corte com o fio diamantado são a presença de fraturas, tensões internas, dureza e a resistência à abrasão do material a cortar, assim como as características geométricas do corte. Deve-se, também, conhecer as características do fio diamantado de modo a obter-se um maior rendimento no corte, como a posição do grupo eletro-hidráulico e das roldanas. Estes aspectos, associados a uma análise do material a cortar, se forem realizados previamente, permitem obter um maior rendimento do processo, assim como menos perda de tempo com a instalação das máquinas de fio diamantado. Outro aspecto que também se deve ter em conta é o posicionamento das furações por onde o fio passa através dos elementos a cortar e os parâmetros de corte usado na máquina de fio diamantado, como pode ser observado pela Tabela 2.2 [Fueyo, 2003; Costa 2009].

Tabela 2.2 - Parâmetros técnicos usados em corte de rochas graníticas [Regadas, 2006].

<b>PARÂMETROS</b>	<b>MODALIDADE OPERACIONAL</b>
Velocidade do Fio	1,5 – 6,0 m/s
Largura do Corte	10 – 12 mm
Desvio Superficial	10 – 40 mm
Consumo de Água	3,0 m <sup>3</sup> /h
Mão-de-obra (n° de operadores)	1,0
Nível de Ruído	70,0 dB

O corte com o fio diamantado é afetado por parâmetros controlados e não controlados. Os parâmetros não controlados são relativos a características das rochas (vide tabela 2.3). Os parâmetros controlados são de âmbito operacional, como: o raio de curvatura do fio (ideal que o fio tenha forma de semicircunferência ou segmento de circunferência), potência da máquina, posição de corte, velocidade periférica e dimensões do corte.

Apesar da simplicidade desta técnica de corte com fio diamantado, é importante ressaltar que a sua utilização exige um bom conhecimento técnico-operacional, devendo-se dar importância às condições geológicas reinantes no maciço rochoso. A melhoria desta tecnologia pode proporcionar maior velocidade de corte, melhor compartimentação do desmonte de rochas, menos impacto ambiental e melhor desempenho da ferramenta.



Tabela 2.3 - Fatores que afetam a eficiência do corte com o fio diamantado  
[Ozcelik and Yilmazkaya, 2011].

Parâmetros não controlados relacionados à característica das rochas	Parâmetros parcialmente controlados ou controlados	
	Propriedades da ferramenta de corte e equipamentos	Condições de trabalho
Dureza	Potência da máquina	Vibração da máquina
Tensões	Posição de corte	Pessoal qualificado
Teor de água	Nº de pérolas por metro	
Grau de Alteração	Velocidade periférica	
Descontinuidades	Raio de curvatura do fio em contato com a rocha	
Propriedade Mineralógicas Características Texturais	Área cortada em relação à variação do ângulo	
	Composição da pérola	
	Dimensões do corte	
	Diâmetro da polia	
	Pressão de contato	

Devido o sucesso alcançado no corte de rochas ornamentais, o fio diamantado encontrou emprego em outras áreas de aplicação, tais como a demolição e reabilitação de estruturas de concreto, inclusive concreto com reforço de aço. A oportunidade de se cortar profundamente uma parede, com elevada precisão, sem barulho excessivo, com baixíssimo nível de geração de poeira, e absolutamente sem risco à integridade estrutural (considerando que o bloco de concreto ou parede cortada pode ser reaproveitada em outro ambiente qualquer), faz com que o fio diamantado seja de uso indispensável em alguns projetos da indústria da construção civil, como por exemplo, na reabilitação controlada de pontes e viadutos, instalações de usinas nucleares, portos flutuantes, hotéis, hospitais, “shopping centers”, estátuas (a estátua de Leonardo da Vinci na Itália de 13 metros de altura, pesando 80 toneladas, teve sua base cortada para relocação via fio diamantado) seja imprescindível o controle dos requisitos acima citados para um bom rendimento da ferramenta de corte [Asperti e Schotte, 1995; Peacock et al, 2000].

### 2.3 – Seleção da Matriz Metálica

As ferramentas diamantadas são produzidas por metalurgia do pó, uma técnica de processamento que oferece a facilidade da mistura de diferentes pós e, conseqüentemente, a possibilidade de criar novos materiais compósitos com propriedades físicas e mecânicas especiais.

A escolha da matriz metálica adequada, no processo de fabricação de ferramenta diamantada, é um aspecto desafiador, pois sua escolha depende da abrasividade do material a ser cortado. Para atingir bom rendimento das ferramentas impregnadas, o metal ligante deve ter boa compatibilidade química e mecânica com o diamante, sendo capaz de segura-lo durante o corte [Artini et al., 2011].

Segundo Konstany [2001], ligantes à base de cobre, bronze, cobalto, tungstênio, carbeto de tungstênio, bem como outras combinações, são largamente utilizados nas operações de serragem de rochas abrasivas. Pequenas adições de alguns elementos de liga como ferro e níquel, também podem ser feitas para ajudar o processo de fabricação, bem como melhorar a retenção do diamante ou as propriedades de desgaste da matriz ligante.

O diamante é um material altamente duro e amplamente utilizado em ferramentas de corte. Atualmente, as ferramentas diamantadas para serra de corte e perfuração são muitas vezes fabricadas pela metalurgia do pó, usando temperatura de sinterização entre 700 e 900°C. Entretanto, pode ocorrer oxidação a 700°C e grafitização a 1000°C para os cristais de diamante, influenciando o desempenho das ferramentas. Além disso, é bastante elevada a energia de interface entre os diamantes e a matriz metálica, existindo grande diferença de coeficientes de expansão térmica, o que reduz a força de atração da interface. Assim o principal fator para um bom desempenho da ferramenta diamantada está relacionada à resistência à oxidação e à grafitização e à força de ligação entre matriz metálica e o diamante [Oliveira, H.C.P, 2010].

Independente do processo de fabricação, a matriz metálica deve cumprir vários requisitos para ser empregada como ligante de ferramenta diamantada e os seguintes fatores podem ser dominantes:

- Concepção da matriz de metal: composição, tamanho de partícula, a temperatura, e duração da prensagem são fatores importantes na escolha da matriz metálica. Os ligantes de baixo ponto de fusão, ou temperaturas de sinterização baixas, e

boas propriedades mecânicas, tornam-se interessantes para que não ocorra grafitação dos diamantes [Artini et al., 2011];

- Resistência ao desgaste: de acordo com Boland e Li [2010], existe uma vasta gama de composições de matriz metálica para diversas aplicações, sendo de suma importância as taxas de desgaste do diamante e da matriz, em função da abrasividade do material a ser serrado. Um ligante “mole” faz com que os grãos de diamante corram risco de serem perdidos prematuramente no início da operação de corte. Por outro lado, uma ligação extremamente forte pode causar um desgaste mais lento do que a quebra dos cristais, causando polimento (aplainamento) da superfície do segmento;
- Capacidade de retenção do diamante: a vantagem de utilizar ferramenta diamantada no corte de rochas ornamentais deve-se às características de auto-afiação. Se a matriz ligante se desgastar rapidamente, os diamantes são destacados durante o corte. Por outro lado, se a matriz se desgastar lentamente, o grão de diamante perde sua eficiência de corte antes de ser retirado. Para equilibrar a taxa de desgaste da matriz metálica, devem-se cuidadosamente selecionar compósitos diamantados de acordo com a abrasividade e a dureza do material a ser cortado [Artini et al., 2011];
- Parâmetros usados no processo de fabricação: o processo de fabricação do segmento impregnado determina o grau de degradação do diamante. As propriedades dos grãos de diamantes no segmento (produto final) dependem fortemente da composição química da matriz ligante e da temperatura de processamento do segmento diamantado. As Ferramentas diamantadas podem ser divididas em três classes, impregnadas, soldadas, e ferramentas galvanizadas, de acordo com o processo de fabricação. Ferramentas impregnadas tem diamantes embutidos em um pó de metal geralmente por Hot-Pressing (prensagem a quente) sinterizadas em moldes de grafite [Artini et al., 2011].

A seleção dos ligantes depende fundamentalmente da abrasividade do material a ser cortado. Normalmente, usa-se tungstênio (W) para o corte de materiais de dureza extremamente elevada, tal qual o concreto. O cobalto (Co), ligas de W-Co para materiais de alta dureza como os granitos. Cobalto, Co-bronze, ferro-Co, Fe-bronze são ligantes empregados no corte de materiais de dureza mais moderada, como os mármore [Przyklenk, 1993].

O carbeto de tungstênio (WC) aumenta a resistência ao desgaste da matriz ligante em relação ao material a ser cortado, controlando a taxa de perda de ligante por abrasão. Quando utilizado, seu teor se situa na faixa de 0,5 a 2% peso, e o tamanho médio de partícula utilizado é da ordem de 5  $\mu\text{m}$  [Mészáros e Vadasdi, 1994].

Os carbetos metálicos (WC, TiC, TaC) apresentam propriedades como elevado ponto de fusão, elevada dureza, elevada condutividade térmica e boa estabilidade química. A combinação de dureza e tenacidade, provenientes dos carbetos e de outras fases metálicas, tem impulsionado estudos referentes à síntese e processamento de materiais e compósitos com fase metálica para produção de ferramentas de corte e matrizes de coroas diamantadas usadas em perfuração e corte de rochas. Nesse contexto, WC é o mais importante carbeto em aplicação, pois sua dureza é da ordem de 16 – 22 GPa (Vickers 500g) e sua temperatura de fusão é da ordem de 2785 °C [Ferreira, 2010].

Segundo Shibuta e colaboradores [1983], o cobalto funciona como um ligante nas ferramentas diamantadas. O silício (Si), quando presente na composição do ligante em pequenas quantidades (< 2 % peso), aumenta adesão deste com os cristais de diamantes, evitando a perda prematura de diamantes por destacamento.

Por muitos anos, o cobalto tem sido usado no processamento das ferramentas diamantadas, por isso, quase a totalidade das ferramentas comerciais são feitas utilizando como ligante o cobalto (Co), em grandes quantidades, pois possui perfeita compatibilidade química com o diamante nas temperaturas de processamento, uma adequada retenção dos cristais de diamante e excelente resistência ao desgaste após processamento ou operação de corte de materiais não metálicos. Apesar de promover elevada adesão para com o diamante, o mesmo é altamente tóxico, é pouco disponível no mercado nacional [Shibuta, 1983; Del Villar et al., 2001; Oliveira et al., 2007].

Devido a este fato, observa-se claramente que, nos últimos anos, pesquisadores desenvolveram propostas de novas ligas alternativas, que podem ser usadas como matriz ligante, visando à substituição ou minimização a porcentagem de cobalto no compósito metal diamante. Portanto, as ligas de Cu-Fe-Co, Co-Cu-Sn, Fe-Co-Cu-Sn e outras ligas alternativas são utilizadas como matriz metálica.

Os novos ligantes metálicos se baseiam no sistema Ferro (Fe) - Cobre (Cu), com adições de cobalto (Co). Entretanto, o paradoxo é que o Fe é um forte agente

catalítico da transformação reversa do diamante em grafite – grafitização, e durante a sinterização (convencional ou por prensagem a quente) este fenômeno pode ocorrer de forma que a ferramenta sofra redução em desempenho e tempo de vida útil [Filgueira e Pinatti, 2002; Cabral e Filgueira, 2010].

Nas ligas metálicas nas quais o ferro é o elemento presente como fase majoritária, é indicado o uso de diamante com cobertura de TiC, pois melhora adesão metal-diamante, e evita/retarda grafitização [Cabral e Filgueira, 2010].

Segundo Artini et al., [2011], quando o compósito diamantado é sinterizado via metalurgia do pó, uma fase de enchimento pode ser utilizada com o objetivo de reduzir a porosidade. Esta é uma fase de baixo ponto de fusão, geralmente consiste em liga à base de Cobre que funde durante a sinterização e preenche os poros. Como esta fase reduz o grau de dureza da matriz, o seu emprego é particularmente adequado para condições de corte menos agressivas e a sua quantidade deve ser reduzida tanto quanto possível durante o corte de materiais muito duros.

O parâmetro usado na prensagem a quente do cobalto pode influenciar na microestrutura, dureza, resistência mecânica, resistência ao desgaste e na ductilidade, sendo assim, o tamanho de partícula e a pureza do pó determinam os métodos a serem utilizados no processo de fabricação da ferramenta diamantada. No entanto, a maioria dos pós-comerciais de cobalto, quando submetidos a uma pressão de 30 a 35 MPa, deve ser prensado por 2 ou 3 minutos à temperatura de 700 a 900°C, para atingir uma densidade completa [Konstanty, 2005].

O cobalto é pouco disponível no mercado e é muito caro (R\$ 310,00/kg) quando comparado com pós facilmente encontrados no mercado brasileiro, por exemplo, ferro (R\$ 16,00/kg) e cobre (R\$ 42,00/kg). Isso tem sido o maior incentivo para o desenvolvimento de novas ligas alternativas usando pós pré-ligados (prealloyed), os quais, normalmente, possuem uma concentração de cobalto máxima de 30% e, por conseguinte, estão menos expostos à histórica flutuação de preço apresentada pelo cobalto ao longo dos anos, além de outras vantagens.

Os pré-ligados consistem de uma combinação de mais de um elemento. Eles são quimicamente pré-ligados num processo de manufatura onde os elementos constituintes são combinados para produzir uma liga finamente dispersa e extremamente homogênea. Isso é feito via atomização, resultando num pó fino, em que cada partícula tem a mesma composição na liga.

Devido ao constante estudo para produzir ligas alternativas do cobalto, Weiss e Ade [2008] desenvolveram uma série de ligas denominada MasterTec-1 e MasterTec-2, que são pós metálicos ligados à base de níquel, ferro e cobalto, mas com apenas uma pequena proporção de cobalto. As propriedades desse novo ligante podem ser observadas na Tabela 2.4. A morfologia do pó MasterTec-1 é mostrado na Figura 2.7, onde a estrutura do pó é muito fina e apresenta partículas aglomeradas, com poros. Os pós são altamente sinterizáveis e suas propriedades se tornam claras durante a prensagem a quente, atingindo uma densidade total na temperatura de 700°C. A Figura 2.8 mostra que o material é sinterizado em diversas temperaturas de sinterização, apresentando densidade e dureza quase constantes entre 700° e 860°C. Uma dureza elevada é atingida pelo MasterTec-1 de 108 HRB e MasterTec-2 de 105 HRB. Todos os ensaios de sinterização (prensagem a quente) foram feitos a uma pressão 35MPa para um tempo de 3 minutos, permitindo uma densidade de aproximadamente 98% compatíveis com o cobalto puro. O ensaio de serrabilidade é mostrado na Figura 2.9, onde a liga MasterTec-2 demonstra um tempo de vida comparável ao cobalto E.F, e a MasterTec-1 um tempo de vida superior de 40 a 50%, dependendo do tipo de cobalto.

Tabela 2.4 - Comparação das propriedades da liga MasterTec com o pó de cobalto E.F [Weiss e Ade, 2008].

<b>Propriedade Técnica do Pó</b>	<b>MasterTec-1</b>	<b>MasterTec-2</b>	<b>Cobalto</b>
Dureza (HRB)	107 - 109	104 - 107	104 – 109*
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	8,03	8,03	8,9
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	7,86	7,87	Max. 8,78*
Densidade relativa (%)	97,9	98,0	Max. 98,7*
Resistência à flexão (N/mm <sup>2</sup> )	1600	1500	1200 – 1600*
Ruptura em% de alongamento	4,5%	8,6%	Não quebra
Resistência ao impacto com entalhe (J/cm <sup>2</sup> )**	3,3	5,1	6,11*

\* Varia entre os diferentes fabricantes.

\*\* Em analogia com o Charpy

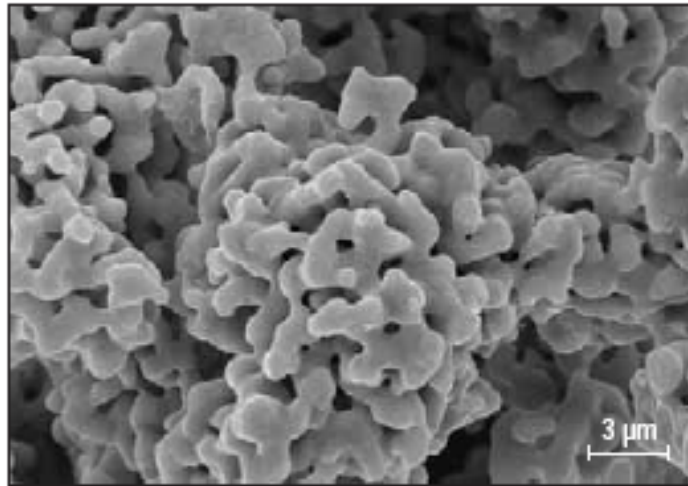


Figura 2.7 - Morfologia das partículas do pó MasterTec-1 [Weiss e Ade, 2008].

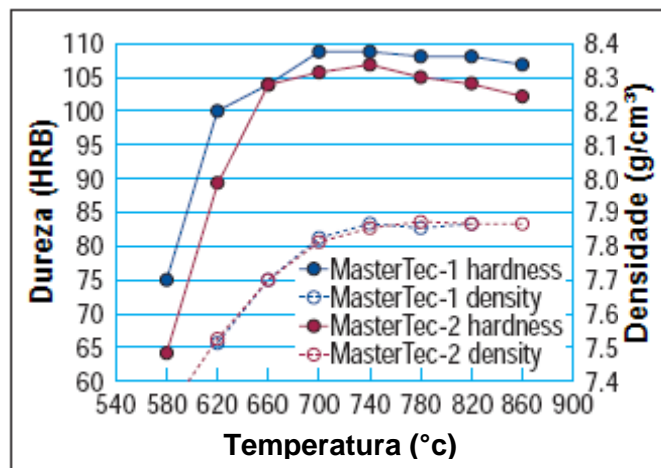


Figura 2.8 – Propriedades do MasterTec-1 e MasterTec-2 (Fe-Co-Ni) processado por prensagem a quente: dureza (HRB) e densidade (g/cm³) [Weiss e Ade, 2008].

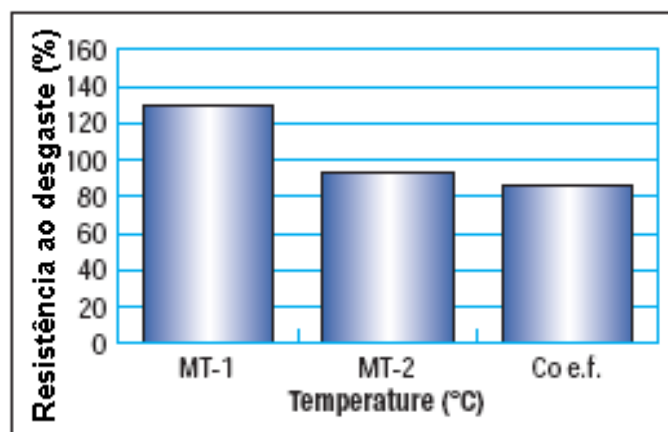


Figura 2.9 – Ensaio de Serragem [Weiss e Ade, 2008].

Segundo Del Villar et al [2001], os novos ligantes metálicos alternativos apresentados no mercado se tornam atrativos, desde que combinem boa sinterização com adequados valores de dureza e resistência ao desgaste, características necessárias quando das operações de corte, especialmente de rochas ornamentais, como mármore e granito, por exemplo.

Em adição aos estudos para obter ligas alternativas ao pó de cobalto, Weiss [2011] desenvolveu a liga MasterTec-3, uma liga à base de ferro, cobre e níquel, sendo absolutamente livre de cobalto. Os melhores produtos são o Mastertec-1 (mostrou excelente resultados de corte), e é normalmente usado para o corte de granito, e o MasterTec-2 (usado para perfuração de concreto armado e corte). Essa nova série de ligante tem mostrado excelentes resultados, pois se mistura facilmente com outros elementos como o bronze, Ferro, Cobre e Cobalto. O comportamento de sinterização do MasterTec-3 é quase idêntico a outras versões do MasterTec, com a diferença de que a sinterização começa a uma temperatura consideravelmente mais baixa, a 660°C. A sua dureza é semelhante à dureza do MasterTec-2, e sua densidade é no mesmo nível. O material é ainda um pouco mais dúctil (resistência ao impacto) e com resistência à flexão inferior quando comparado com outras ligas MasterTec. Uma comparação dos valores tecnológicos das três versões MasterTec é mostrada na Tabela 2.5. Pode-se observar na Figura 2.10 que, no ensaio de resistência ao desgaste, a ferramenta MasterTec-3 atinge o mesmo desempenho que MasterTec-2. A adição de 40%p de cobre (Cu) no MasterTec-1 aumenta consideravelmente a dureza de 93 para 100HRB e a densidade de 94.5 para 97.9%. A micrografia deste sinterizado é exposta na Figura 2.11 e as alterações da dureza, densidade e volume de rocha cortado são apresentadas na Tabela 2.6.



Tabela 2.5 – Comparação das propriedades das três ligas MasterTec [Weiss, 2011].

Propriedades		MasterTec-1	MasterTec-2	MasterTec-3
Dureza	(HRB)	107 - 109	104 - 106	104 - 106
Massa Específica	(g/cm <sup>3</sup> )	7,86	7,86	7,90
Densidade Teórica	(g/cm <sup>3</sup> )	8,03	8,03	8,03
Resistência à Flexão	(N/mm <sup>2</sup> )	1600	1500	1300
Energia de Tração	(Nm)	>2,4	>6,2	>2,8
Dobramento	(%)	>4,5	>8,6	>4,3
Resistência ao Impacto	(J/cm <sup>2</sup> )	3,3	5,1	6,0
Temperatura de Prensagem a Quente	(°C)	>700	>660	>660

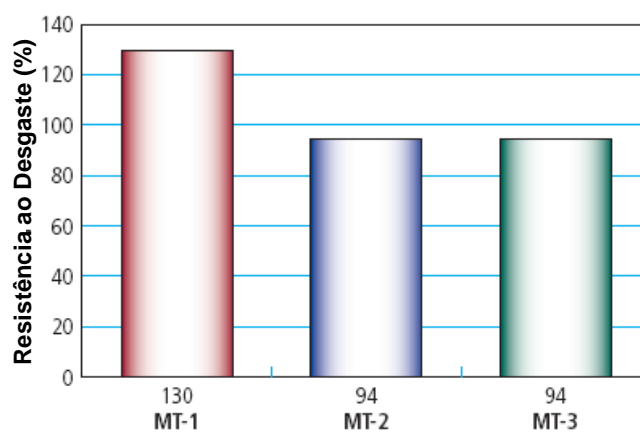


Figura 2.10 – Ensaio de resistência ao desgasta das três versões da liga MasterTec [Weiss, 2011].

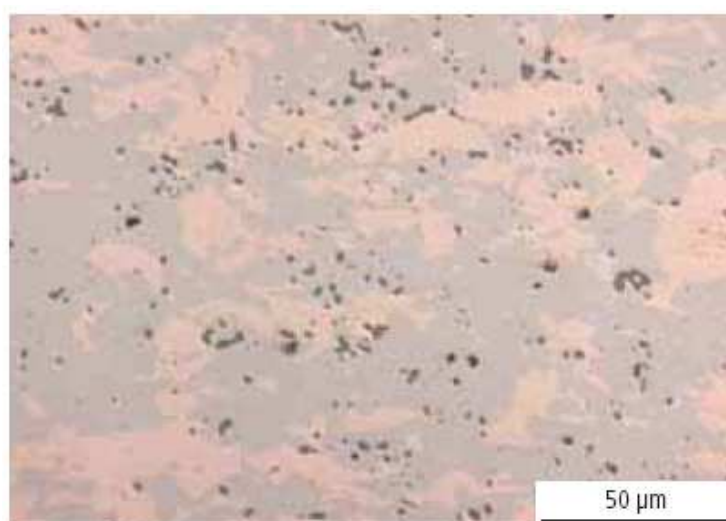


Figura 2.11 - Micrografia da liga MasterTec-1, com adição de 40%p de cobre fino. (p = 196MPa; T = 1000 °C; t = 60 min) [Weiss, 2011].

Tabela 2.6 – Mudança na propriedade tecnológica do MasterTec- 1, com adição de 40%p de cobre [Weiss, 2011].

	Dureza	Densidade relativa	Volume de desgaste da ferramenta
MasterTec-1	93 HRB	94,5%	229 mg
MasterTec-1 + 40% Cu	100 HRB	97,9%	391 mg
Condições de sinterização: (p = 196MPa; T = 1000 ° C; t = 60 min)			

Del Villar et al [2001] estudaram duas novas ligas comerciais pré-ligadas, alternativas do cobalto puro, denominada NEXT, um pó à base de Cu-Fe-Co, onde o cobre é o elemento de maior teor. A Tabela 2.7 mostra a composição química dessas novas ligas, processadas pela rota de prensagem a quente (hot pressing), onde usou-se pressões de 30 a 35 MPa, temperaturas de sinterização entre 600 e 750°C, para um tempo de 3 minutos.

Tabela 2.7 – Composição química (% em peso) das ligas NEXT Cu-Fe-Co [Del Villar et al., 2001]

Matriz Ligante	O <sub>2</sub> (%)	C (%)	Cu (%)	Fe (%)	Co (%)
<b>NEXT 100</b>	1,07	0,039	49,5	25,2	24,1
<b>NEXT 200</b>	1,04	0,039	61,7	14,7	22,6

O resultado encontrado por Del Villar et al [2001] mostrou que foram encontrados 97% da densidade teórica no processo de prensagem a quente, usando temperaturas tão baixas quanto 720 e 650°C, respectivamente para NEXT 100 e NEXT 200, pois maiores teores de cobre propiciam temperaturas menores para se alcançar uma densidade satisfatória nestes materiais (Figura 2.12). Pode-se observar na Figura 2.13, que a dureza está entre 85 e 109 HRB e, o NEXT 200 tem dureza maior que o NEXT 100 para temperaturas de sinterização na faixa de 600-650°C, o que é meramente um efeito atribuído à diferença de densidade. Os autores observaram que a dureza final das ligas é inicialmente controlada pela porosidade até um certo nível de densidade encontrada (95%) pois acima desta, a propriedade

é fortemente dependente da proporção Fe-Cu. Quanto maior for a proporção Fe-Cu, maior é a proporção da fase dura (solução sólida Fe-Co), portanto, maior a dureza da liga. Conforme Oliveira (2009), isso pode ser reforçado analisando-se a seção isotérmica em 850° (Figura 2.14), do diagrama de fases ternário Cu-Fe-Co, onde observa-se que ambas as ligas são vistas na região pseudobinária Cu (cfc) + Fe- $\alpha$  (ccc). Adicionalmente, este diagrama mostra também que, devido à solubilidade limitada do Cu na solução sólida Fe-Co (ccc), nesta temperatura (cerca de 2% em peso), a microestrutura final do material é necessariamente aquela de um material bifásico, com cobre como fase contínua. Pode-se observar na Figura 2.15 a microestrutura da liga NEXT 100, processada por prensagem a quente, a 700°C, pressão de 30 MPa, durante 3 minutos. Observa-se que a fase rica em cobre (contraste em branco) exibe uma banda extensa na direção perpendicular ao eixo de aplicação da pressão, como resultado da deformação plástica causada pela pressão aplicada a temperaturas elevadas. É também identificada presença de alguns poucos óxidos de ferro (em preto), também alinhados na direção perpendicular ao eixo da pressão, onde esta disposição anisotrópica da microestrutura, sugere o papel crítico do fluxo plástico como importante mecanismo de densificação durante a prensagem a quente.

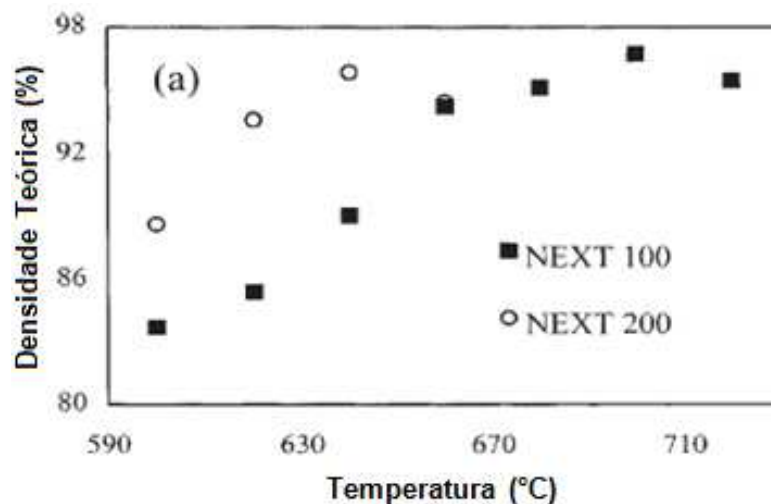


Figura 2.12 – Curvas de densificação das ligas NEXT Cu-Fe-Co processadas por prensagem a quente [Del Villar et al., 2001]

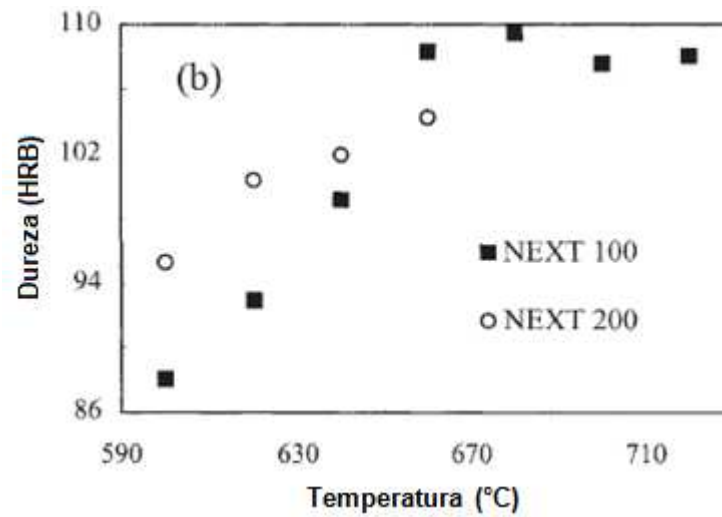


Figura 2.13– Curvas de dureza HRB das ligas NEXT Cu-Fe-Co processadas por prensagem a quente [Del Villar et al., 2001].

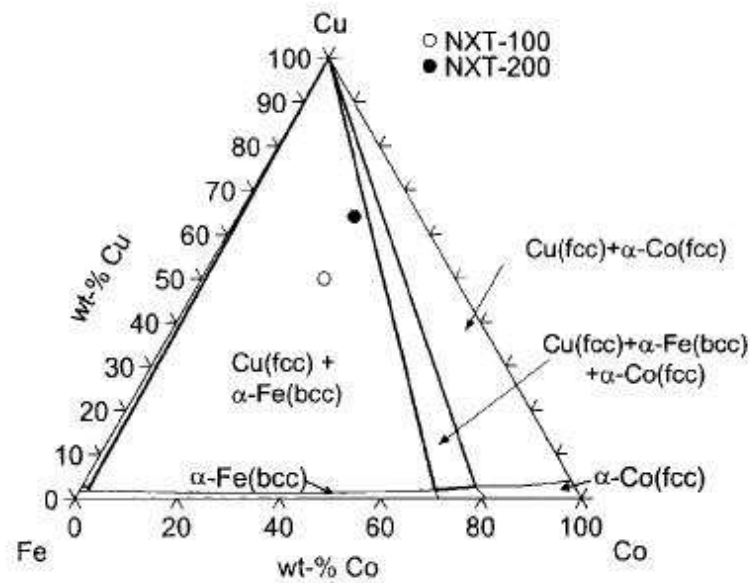


Figura 2.14 – Seção isotérmica (850°C) do diagrama de fases ternário das ligas NEXT Cu-Fe-Co [Del Villar et al., 2001].

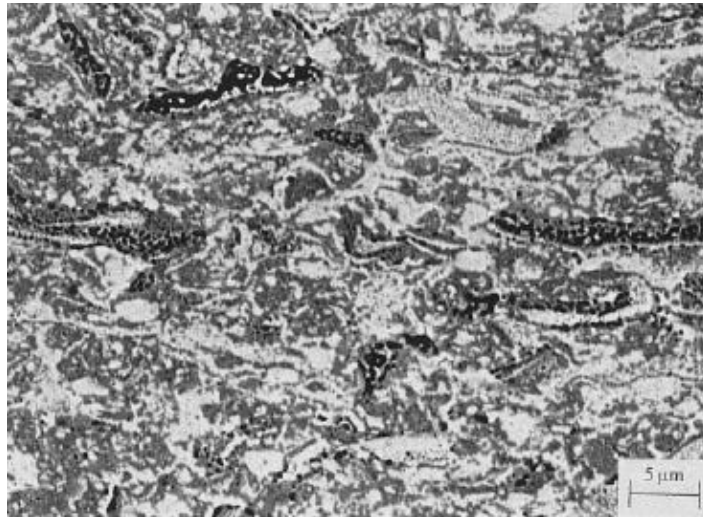


Figura 2.15 – Micrografia da liga NEXT-100 Cu-Fe-Co processada por prensagem a quente ( $T= 700^{\circ}\text{C}$ ,  $P= 30\text{MPa}$ ,  $t= 3$  minutos), mostrando a fase dúctil rica em cobre (contraste branco), fase Fe-Co (em cinza) e óxidos de ferro (em preto) [Del Villar et al., 2001].

O cobalto é tecnicamente um excelente ligante para processar ferramentas diamantadas, mas requer uma temperatura de sinterização bastante elevada, especialmente no caso de sinterização convencional.

A cobalite HDR é uma liga à base de ferro com 66%pFe-7%pCu-27%pCo, dura, resistente à oxidação e, como ligante, apresenta excelente resistência à abrasão. Combina excelente retenção do diamante com um ótimo comportamento de sinterização. Foi desenvolvido para substituir os tradicionais ligantes de cobalto com adições de carbeto de tungstênio (WC), em aplicações da área construção que demandam um elevado grau de qualidade e desempenho, como serragem de pisos, paredes e muros, concreto reforçado e outras aplicações [Clark e Kamphuis, 2002].

Kamphuis e Serneels [2004] desenvolveram uma liga especial sem cobalto, sendo esta à base de Fe-Cu-Sn-W (Cobalite CNF) que tem propriedades e “papéis” similares ao do cobalto puro na ferramenta, mas com a vantagem de uma temperatura de sinterização menor e, em adição, pode ser obtido um excelente desempenho sem a presença de alguns aditivos comuns como níquel e principalmente cobalto.

Para análise comparativa, as composições de três ligas Cobalite à base de Fe-Cu-Co (Cobalite 601), Fe-Co-Cu (Cobalite HDR) e Fe-Cu-Sn-W (Cobalite CNF), são apresentadas na Tabela 2.8. No processamento por prensagem a quente, a Cobalite CNF atinge a melhor densidade, aproximadamente > 98%, para o intervalo de temperaturas entre 675 e 875°C (Figura 2.16.a). A Figura 2.16 (c), ilustra que a Cobalite HDR possui maior dureza (aproximadamente 105 e 108 HRB) em temperaturas entre 700 e 875°C. A ductilidade dos três ligantes (resistência ao impacto) varia consideravelmente, porém na temperatura de 775 e 875°C, a Cobalite HDR possui uma resistência ao impacto constante para cinco pontos Charpy, conforme a Figura 2.16 (d).

Tabela 2.8 – Composição das ligas Cobalite 601, Cobalite HDR, Cobalite CNF e propriedades de processamento [Umicore, 2012].

<b>Principais elementos (%)</b>	<b>Cobalite 601</b>	<b>Cobalite HDR</b>	<b>Cobalite CNF</b>
Co	10	27	---
Cu	20	7	26
Fe	70	66	68,4
Sn	---	---	3
W	---	---	2
Y203	---	---	0,6
<b>Outras propriedades</b>			
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	8,16	8,19	8,19
Tamanho de partícula (µm)	10	12	11
Temperatura de Prensagem a quente (°C)	700 - 775	750 - 800	675 - 800

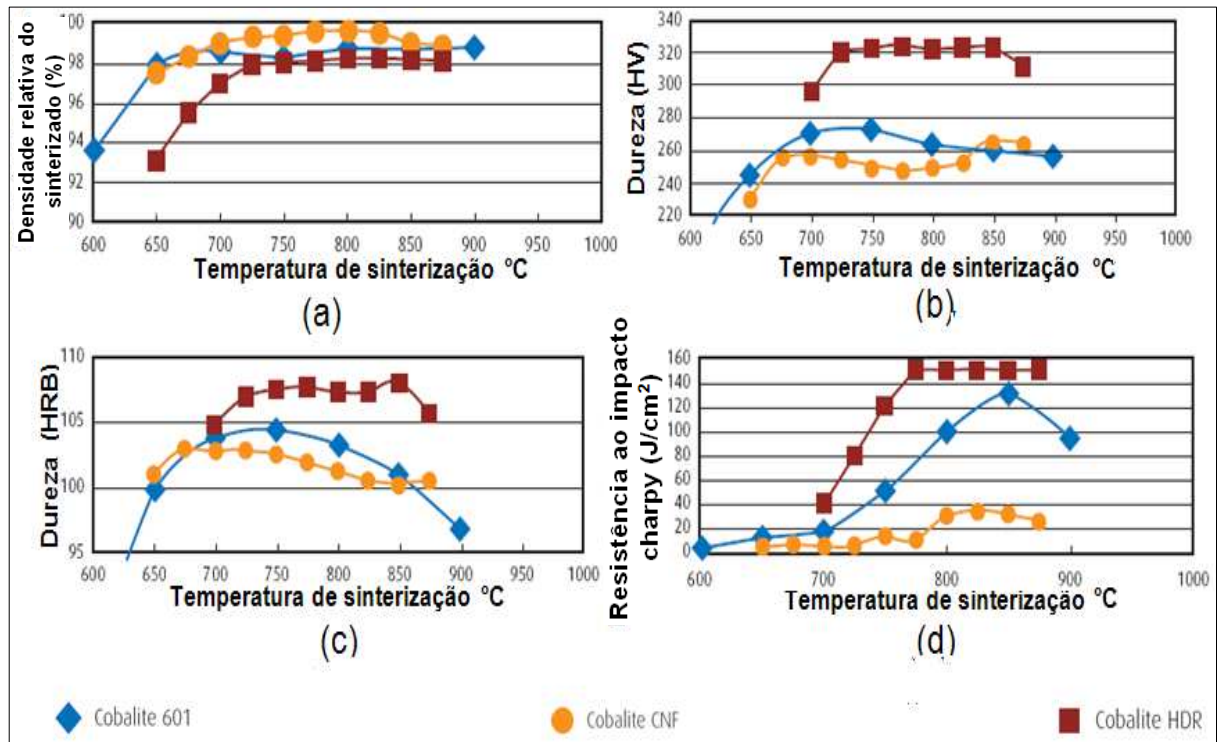


Figura 2.16 - Influência da temperatura de sinterização por prensagem a quente nas propriedades do cobalite 601 (azul), cobalite HDR (vermelho) e Cobalite CNF (amarelo). Figura: (a) densidade relativa; (b) dureza HV; (c) dureza HRB; (d) resistência ao impacto [Umicore, 2012].

Nos últimos anos, pesquisadores desenvolveram propostas de novas ligas alternativas, que podem ser usadas como matriz ligante, visando a substituição ou minimização do teor de cobalto no compósito metal/diamante. Os pós pré-ligados à base de ferro e cobre, tem como finalidade substituir o cobalto na fabricação de ferramentas de corte do setor de rochas ornamentais e construção civil. Nesse sentido, Weber e Weiss [2005], desenvolveram e lançaram no mercado mundial uma série de 3 novas ligas alternativas ao cobalto, chamadas DIABASE (Fe-Cu-Co-Sn), cujas composições básicas são mostradas na Tabela 2.9. Os melhores produtos são o DIABASE-V07, que mostrou excelentes resultados de corte, quando utilizado com diamantes cobertos com titânio, e o DIABASE-V18, normalmente usado para o corte de granito. A Figura 2.17 mostra o gráfico de sinterização da liga DIABASE-V21, onde se observa um nível de massa específica satisfatória e uniforme de cerca de 8,10 g/cm<sup>3</sup> (> 98,5%) para o intervalo de temperaturas entre 780 e 900°C e, praticamente para o mesmo intervalo, dureza entre 94 e 97 HB.

Os campos de aplicação da liga DIABASE-V21 são múltiplos e, em sua forma pura (Tabela 2.9), pode ser usada para corte de granito, juntas de concreto e outras estruturas. O uso de alguns aditivos conhecidos, como bronze e carbeto de tungstênio, por exemplo, pode influenciar marcadamente propriedades como densidade, dureza, resistência à abrasão e ao impacto, o que conseqüentemente aumenta o campo de aplicação.

Tabela 2.9 – Composição aproximada dos ligantes DIABASE  
[Weber e Weiss, 2005].

Nome	Fe	Co	Cu	Sn
DIABASE-V07	45 – 65%	20 – 40%	< 15%	-
DIABASE-V18	35 – 55%	25 – 35%	< 25%	< 8%
DIABASE-V21	55 – 75%	< 15%	< 25%	< 8%

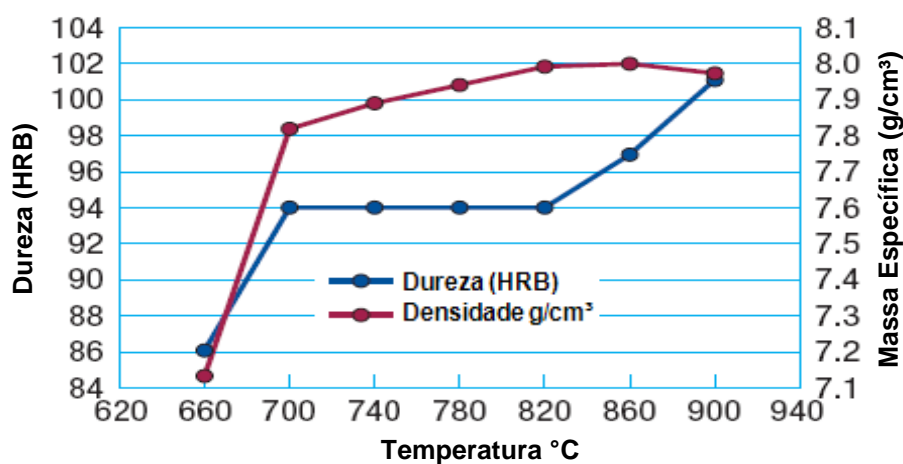


Figura 2.17 – Dureza e massa específica em função da temperatura de sinterização da liga DIABASE-V21 [Weber e Weiss, 2005].



## 2.4 – Processamento Industrial das Ferramentas Diamantadas Impregnadas

A metalurgia do pó se dedica à produção de peças a partir de pós-metálicos e não-metálicos. Normalmente, esta tecnologia é usada no processamento de peças com formato difíceis de ser moldados em outro processo, ou para a obtenção de propriedades que essa técnica propicia com adequação técnica-econômica.

A rota industrial de fabricação de ferramentas diamantadas impregnadas comercialmente disponíveis no mercado é processada por prensagem a quente (hot pressing) ou a frio (cold pressing), seguida de sinterização em forno a vácuo (ou atmosfera protetora). O fluxograma esquemático do processo de fabricação é esboçado na Figura 2.18.

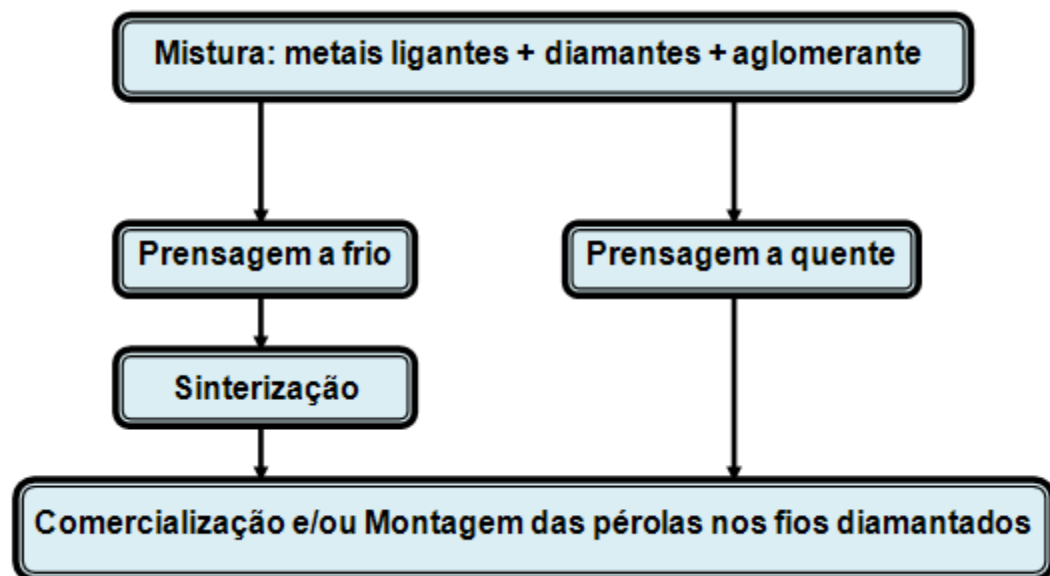


Figura 2.18 – Rotas industriais de fabricação de ferramentas diamantadas impregnadas.

Nos dias atuais, a maioria das ferramentas diamantadas é produzida pela tradicional rota de prensagem a quente, que pode ser finalizada por infiltração metálica em alguns casos, mas também algumas destas ferramentas são produzidas por prensagem a frio e sinterização. Durante o processo, as partículas de diamante são ligadas à matriz metálica por uma combinação de interações químicas e físicas e se faz necessário um rígido controle dos parâmetros de processamento (temperatura e pressão) para evitar ataque, dissolução e/ou grafitação do diamante, o que pode afetar o desempenho final do corte [Filgueira e Pinatti, 2002; Oliveira et al., 2007].

A prensagem a quente é um processo de deformação do pó metálico que envolve a aplicação simultânea de pressão e temperatura, resultando em um produto com maior densidade relativa, quando comparado com sinterização convencional [Sarin et al., 2003].

A Figura 2.19 mostra o ciclo de prensagem a quente. O tamanho e forma de partículas são características importantes, pois determinam o gradiente de porosidade. O primeiro estágio consiste em aquecer o pó metálico até uma temperatura adequada ao tipo de ligante e simultaneamente, usa uma pressão uniaxial pré-determinada. O segundo estágio consiste em permanecer com temperatura e pressão desejada por um certo período de tempo, com intuito de ocorrer o processo de sinterização. O terceiro estágio consiste no resfriamento dos compósitos confeccionados via metalurgia do pó.

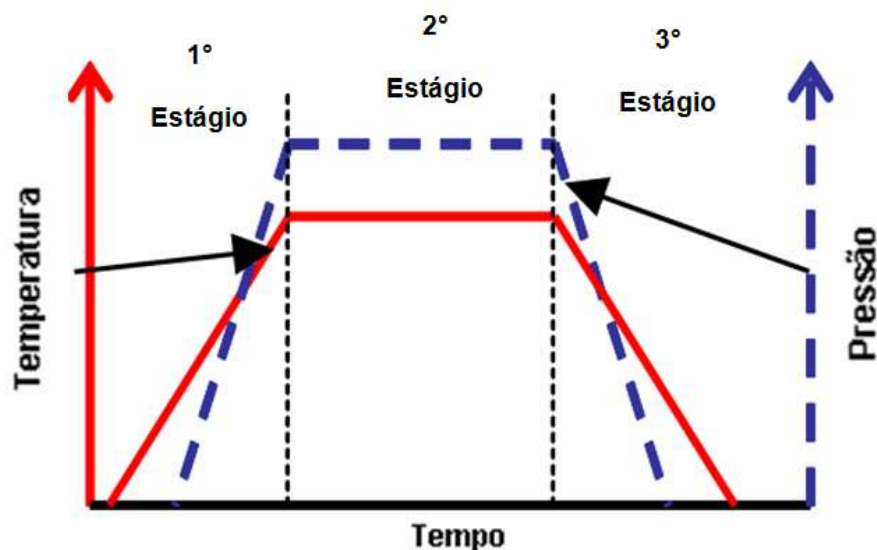


Figura 2.19 – Ciclo de prensagem a quente [Sarin et al., 2003].

Vale ressaltar que, antes da prensagem a quente ou sinterização convencional, a etapa inicial do processamento consiste da mistura dos metais ligantes com o diamante. Normalmente, esta etapa é realizada em misturadores industriais rotativos, utilizando um aglomerante tal como o estearato de zinco, o qual possibilita a aglomeração entre as partículas da mistura dos pós, bem como atua como lubrificante entre a mistura e as paredes da matriz de compactação. Este aglomerante volatiliza por completo em temperaturas inferiores a 500°C, não formando compostos com os ligantes.

Os diamantes utilizados, por exemplo em serras, pérolas de fio diamantado e discos, apresentam alta qualidade, granulometria 40/50 e 50/60 mesh na concentração 50. Estes diamantes apresentam elevadas tenacidade, condutividade térmica e dureza especificada na granulometria e concentração usual para a sua determinada aplicação, de acordo com o tipo de ferramenta [GE Superabrasives, 1994]. A Tabela 2.10 exemplifica algumas relações de concentrações e densidades de diamantes nas ferramentas de corte convencionais.

Tabela 2.10 – Concentração versus densidade de diamantes em ferramentas de corte [GE Superabrasives, 1994].

Concentração de Diamantes	Massa de diamante/cm <sup>3</sup> de volume abrasivo		Volume de diamante (cm <sup>3</sup> )/ cm <sup>3</sup> da ferramenta
	Quilates	Gramas	
150	6,6	1,32	0,38 (38%)
125	5,5	1,10	0,32 (32%)
100 (*)	4,4	0,88	0,25 (25%)
75	3,3	0,66	0,19 (19%)
<b>50</b>	<b>2,2</b>	<b>0,44</b>	<b>0,13 (13%)</b>
42	1,85	0,37	0,11 (11%)
30	1,32	0,26	0,07 (7%)
25	1,10	0,22	0,06 (6%)

A (\*) Concentração 100 refere-se a 25% em volume de diamante por cm<sup>3</sup>, e tem como base 4,4 quilates de diamantes/ cm<sup>3</sup>, e 1 quilate = 0,2 gramas. O n° entre parênteses da última coluna refere-se a porcentagem em volume de diamante na ferramenta e é encontrado dividindo-se a massa de diamante da penúltima coluna, pela densidade do diamante ( $\rho_{DIAM.} = 3,48\text{g/cm}^3$ )

Na rota de obtenção de ferramentas diamantadas via metalurgia do pó convencional (MP), após a etapa de mistura dos pós, procede-se à prensagem uniaxial ou isostática a frio da mistura, obtendo-se um “corpo verde” de dimensões próximas da futura ferramenta (compósito diamantado). Na sequência, executa-se a sinterização, a qual garantirá a consolidação do corpo verde [Przyklenk, 1993; Filgueira e Pinatti, 2003].

Na rota de prensagem a quente, após a etapa de mistura, esta é vertida através de um dosador, dentro de orifícios de uma matriz de compactação, que normalmente é rígida (prensagem uniaxial), onde a mistura é prensada concomitantemente assistida por temperatura, ocorrendo a sinterização [Urakawa et al., 2000]. Isto é, a mistura é vertida dentro dos 30 furos de um molde de eletrografite (constituição industrial mais comum), e este arranjo é colocado dentro da câmara e prensada a quente, utilizando-se eletrodos de grafite, dotados de punções, os quais penetram pelos orifícios do molde, compactando a mistura através de um sistema hidráulico. Os eletrodos transmitem a corrente elétrica, propiciando a sinterização dos compactos.

As curvas de densificação da Figura 2.20 são correspondentes à prensagem a quente de vários pós-comerciais pré-ligados tais como NEXT 100 ( Cu-Fe-Co), NEXT 200 (Cu-Co-Fe), NEXT 300 (Fe-Co-Cu), NEXT 900 (Fe-Cu), COBALITE 601 (Fe-Cu-Co), COBALITE HDR (Fe-Co-Cu) e COBALITE CNF (Fe-Cu-Sn-W). Pode-se observar que a liga NEXT 200 alcança a maior densidade teórica (aproximadamente  $> 8,5\text{g/cm}^3$ ) usando temperaturas tão baixas quanto 750 e 600°C, respectivamente, pois ligas com maiores teores de cobre exigem temperaturas menores para se alcançar uma densidade satisfatória nestes materiais. A liga NEXT 100 atingiu sua maior densidade ( $8,4\text{ g/cm}^3$ ) na temperatura de 750 °C. Entre as ligas Cobalite, as que apresentaram melhores resultados são o CABALITE CNF, que atingiu um nível de densidade satisfatória (aproximadamente  $> 8,1\text{ g/cm}^3$ ), e o COBALITE HDR ( $8,0\text{ g/cm}^3$ ). Todos os ensaios de sinterização (prensagem a quente) foram feitos a uma pressão de 35 MPa para um tempo de 3 minutos, onde as curvas típicas de sinterização mostram que excelentes densidades são desenvolvidas em temperaturas de sinterização entre 650 e 900 °C [Konstanty, 2005].

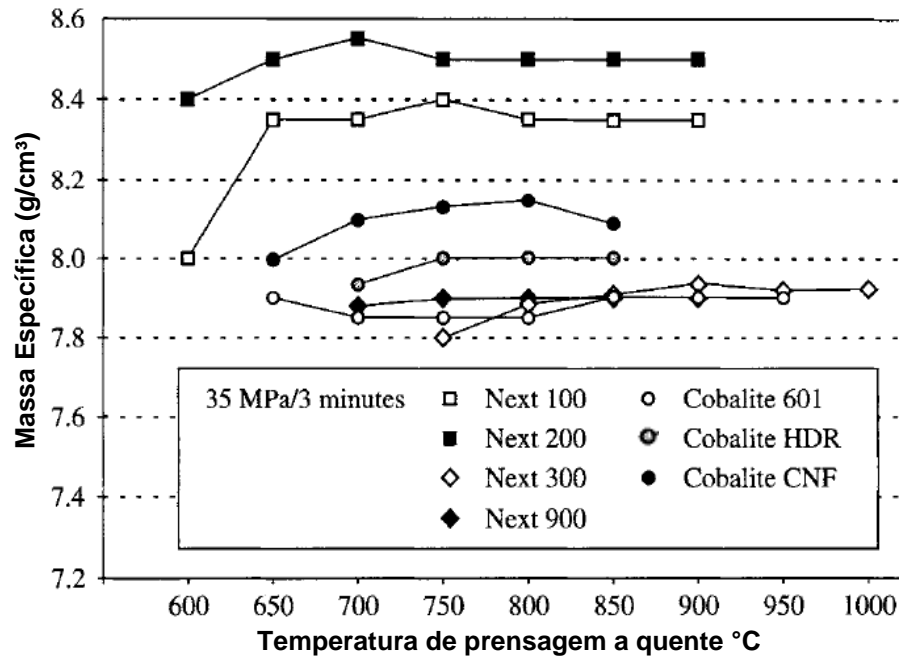


Figura 2.20 – Curvas de prensagem a quente dos pós-comerciais substitutos do cobalto puro [Eurotungstene Metal Powders, 1996; Kamphuis e Serneels, 2004; Konstanty, 2005].

Como já mencionado anteriormente, a pressão, temperatura e tempo são parâmetros críticos na prensagem a quente, pois determinam a qualidade da peça produzida. Tais parâmetros são determinados empiricamente pelos fabricantes de ferramentas diamantadas. Todavia, o aquecimento combinado com aplicação de pressão é uma operação com diversas restrições, pois os moldes feitos de grafite são caros e podem resistir somente a algumas operações, podendo sofrer ruptura, se sobrecarregados [Ferreira, 2010].

Após a sinterização, seja pela rota convencional ou por prensagem a quente, procede-se com a brasagem dos segmentos de compósito diamantado impregnado nos suportes da ferramenta.

## 2.5 – A Retenção dos Cristais de Diamante

A capacidade da matriz metálica em segurar os cristais de diamantes, influencia o rendimento das ferramentas de corte, pois a união entre matriz e diamante determina as características microestruturais. A matriz metálica impregnada com cristais de diamantes é usada em ferramentas para o beneficiamento de rochas ornamentais, perfuração de concreto e alvenaria, reparação de estradas de exploração de petróleo, corte de cerâmica, entre outras.

Os principais requisitos da matriz metálica de uma ferramenta diamantada é sua adesão aos cristais de diamantes e, por fim, propiciar propriedades mecânicas e resistência ao desgaste adequadas às operações severas de trabalho, pois durante o corte os diamantes contidos na ferramenta são submetidos a esforços mecânicos e sua matriz é submetida à deformação plástica [Romanski et al, 2006].

Diamantes de engenharia avançada fornecem os atributos específicos de tamanho, forma e resistência ao impacto necessários para obter um ótimo desempenho para diferentes tipos de materiais, condições e operações. Um fator chave que assegura um desempenho superior e máxima vida útil da ferramenta diamantada é a retenção dos cristais individuais. Um desempenho satisfatório para estas ferramentas é determinado pelo grau de retenção do cristal na matriz metálica (R), podendo ser quantificado como a seguinte razão [Webb, 1999]:

$$R = \frac{\text{(Área de Contato) (Tensão Compressiva da Matriz sobre o Diamante)}}{\text{Força de Contato}}$$

Ou

$$R = \frac{\text{(Força de atrito entre a Matriz e o Diamante)}}{\text{Força de Contato}}$$

A área de contato (entre o cristal de diamante e matriz ligante) multiplicada pela tensão compressiva na matriz, é igual à força de atrito entre a matriz e o diamante.

Uma boa retenção com a matriz ligante é alcançada se R é maior que 1, e maiores valores para a retenção são alcançados com um ligante adequado que

exibe elevada tensão compressiva de sinterização, bem como um enorme nível de atrito e adesão entre o diamante e a matriz [Webb, 1999].

A Figura 2.21 ilustra as forças atuando em um cristal de diamante impregnado em um segmento metálico, considerando-se que a área de contato é em relação à matriz e o diamante.

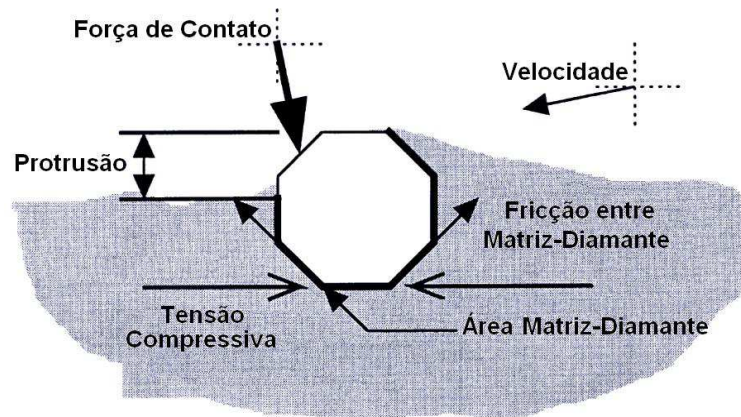


Figura 2.21 – Diagrama esquemático da distribuição de forças atuantes em um cristal de diamante, embebido em matriz metálica, durante operação de corte: serra diamantada [Webb, 1999].

A capacidade da matriz metálica confinar rigidamente os cristais de diamantes influencia o rendimento das ferramentas de corte, pois a união entre matriz e diamante determina as características microestruturais. Na operação de corte de materiais não metálicos, as ferramentas diamantadas estão submetidas frequentemente a impactos mecânicos, os quais intensificam a fadiga de contato. Desta forma, é fundamental a seleção de uma matriz metálica ligante adequada para adesão dos diamantes.

O Travamento mecânico é um dos principais fatores que retém os cristais de diamantes na matriz metálica, sendo decorrente de condições superficiais apresentadas por ambas as superfícies em contato. A diferença entre os coeficientes de expansão térmica do diamante e da matriz, portanto, afeta fortemente a adesão dos diamantes. Os parâmetros utilizados no processo de fabricação, tais como composição química, granulometria do pó metálico, distribuição de tamanho das partículas, fases das partículas, temperatura de sinterização e pressão sobre a matriz, combinados entre si, determinam as propriedades das ferramentas [Romanski et al, 2006].

A tensão compressiva surge de diferenças entre os coeficientes térmicos da matriz e do diamante, aumentada por alguma variação de volume devido à sinterização da matriz, e a tensão compressiva, que é utilizada pela matriz, está limitada pela sua resistência ao escoamento. Uma vez que a tensão de escoamento está relacionada com a dureza, a dureza da matriz ligante pode ser indiretamente relacionada ao confinamento por adesão dos cristais de diamante na matriz ligante. Em aplicações pesadas, como na serragem e perfuração de rochas duras ou concreto, a pressão de contato por cristal de corte pode ser maior que 1 GPa [Webb, 1999].

A ausência de ligação forte entre a matriz e o diamante indica uma baixa adesão do diamante na matriz, resultando em aberturas, que são oriundas de fadiga de contato, geradas pela ação intermitente de contatos de deslizamento. Sendo que, propriedades elásticas (tensão de escoamento baixa e módulo de elasticidade alto) da matriz metálica, conduzem ou levam a este efeito indesejável.

A Figura 2.22 sugere dano por fadiga de contato da matriz metálica, destacada por setas, predizendo uma eventual falha do cristal de diamante, levando à formação de “gap”. O cristal de diamante é destacado em relação à matriz, revelando também danos abrasivos profundos e a borda da matriz metálica com o diamante não é bem formada. Considerando esses aspectos, a retenção, nesse caso, tende a limitar a vida da ferramenta.

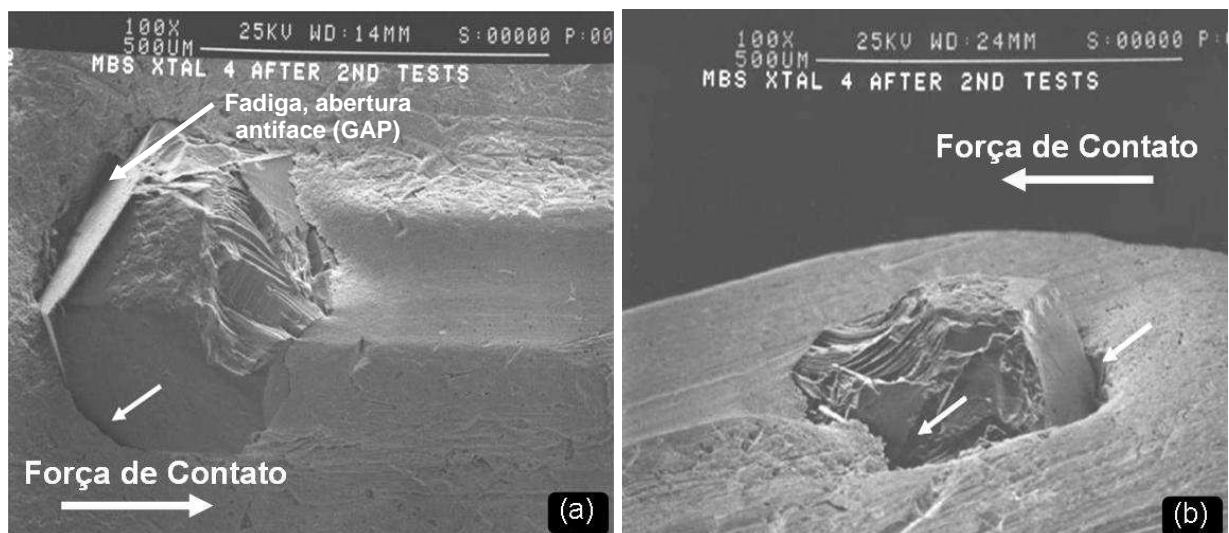


Figura 2.22 – Fadiga de contato da matriz metálica ligante predizendo uma eventual falha do cristal de diamante [Webb, 1999].



Segundo Romanski et al [2006] no mecanismo de retenção, os diamantes ficam expostos ao desgaste juntamente com a matriz metálica circundante, cuja capacidade de retenção do diamante está associada ao seu módulo de Young e à sua dureza, propriedades que governam a energia gasta para induzir a deformação plástica do material. A combinação de baixa dureza com alto módulo de Young facilitará a deformação da matriz e permitirá o descolamento entre diamante e matriz, como ilustrado na Figura 2.22.

Webb [1999] afirmou que revestir os cristais de diamante com uma camada fina de metal pode ser uma ótima opção para os problemas relacionados à retenção sem alterar a composição da matriz ou o processo de sinterização, ou limitar o desempenho da ferramenta. Um revestimento pode acrescentar textura à superfície plana e lisa do diamante, permitindo melhor aderência mecânica com a matriz e durante o processo de sinterização, estes revestimentos reagem quimicamente com o pó do qual a matriz é formada para formar carbetos, ligas ou fases duras que fortalecem a ligação entre o diamante e a matriz.

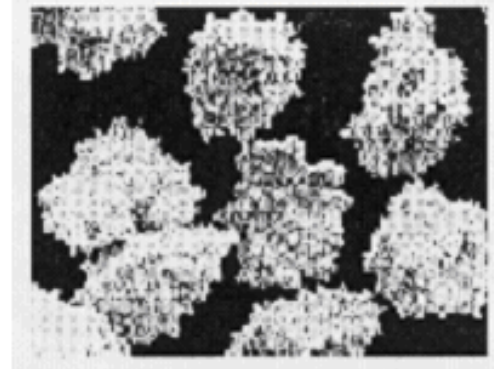
Durante os anos 90, revestimentos finos de metal foram desenvolvidos para atender a demanda das indústrias para a melhoria da retenção do cristal e aumentar a vida das ferramentas. Revestindo o diamante com uma camada fina de Titânio (Ti) ou Cromo (Cr), obtém-se alta efetividade no fortalecimento da ligação entre o diamante e sua matriz, e um aumento na resistência ao ataque químico. Ambos são excelentes formadores de carbetos, o que conduz para uma boa adesão entre o revestimento e o cristal e, durante a sinterização, esses revestimentos metálicos formam uma liga ou solução sólida que adere o revestimento com a matriz, assegurando um confinamento funcionalmente eficaz. Em adição, mostram um alto nível de compatibilidade metalúrgica com os elementos comuns da matriz, semelhantes ao Cobalto [Jakobuss, 2000].

Os revestimentos sobre os diamantes têm duas principais funções que exploram diferentes propriedades daqueles, tendo efeitos diferentes sobre seu comportamento em uso. O primeiro, é aumentar a retenção do diamante na matriz, por formar um elo químico/mecânico entre o diamante e a matriz. O segundo, é de proteção da superfície do diamante contra ataques catalíticos de alguns materiais tais como ferro (Fe), níquel (Ni) e Co presentes na matriz, podendo desta forma grafitizar o material [De Châlus, 1994; Konstanty, 1991].

De acordo com Jakobuss [2000], um revestimento de níquel (Ni) é normalmente aplicado ao diamante em discos para usinagem de cerâmicos, e usam matriz ligante de resina, como ilustrado na Figura 2.23.



**Revestimento de Níquel (56% peso)**



**Revestimento de Níquel (60% peso)**

Figura 2.23 – Os revestimentos adicionam massa e textura à superfície dos cristais [Jakobuss, 2000].

As características de revestimento dos cristais de diamante são muito importantes para otimizar a retenção e, conseqüentemente, aumentar a produtividade e a vida da ferramenta.

## 2.6 – Mecanismo de Desgaste dos Compósitos Diamantados

Analisando de uma maneira geral as ferramentas de corte, a ação de corte e o atrito entre as superfícies de contato intensificam a pressão de contato, e a temperatura na ferramenta, o que acelera os processos físicos e químicos associados com o desgaste da ferramenta. Este ocorre ao longo da zona de corte e nas superfícies adjacentes, quando temperatura, tensões e velocidade atingem níveis críticos [ASM HANDBOOK, 1979].

Uma importante e complexa área de interesse no estudo do desgaste tem sido a identificação dos mecanismos de desgaste. O que tem sido descoberto é que os mecanismos de desgaste são dependentes da pressão de contato, das velocidades relativas na interface de desgaste, da temperatura, e das propriedades físicas e químicas dos contatos entre esses materiais. Para um determinado grupo de materiais em contato, o desgaste tem sido analisado para determinar a pressão normal e a velocidade que resulta em um mecanismo de desgaste em particular [Lim

e Ashby, 1987]. Existem quatro categorias do mecanismo de desgaste dos cristais de diamante que são aceitas. Sendo elas:

- Desgaste por adesão: o diamante adere à superfície do material cortado, e é expulso da matriz metálica;
- Desgaste por abrasão: os grãos muito duros da rocha tendem a riscar a superfície do diamante;
- Desgaste por fratura frágil: os cristais de diamante são fraturados (quebrados) devido a impactos ou por fadiga de contato;
- Desgaste por fusão do ligante: aumento da temperatura, pressão de contato e velocidade da ferramenta de corte, fundindo a matriz ligante.

A intensificação da pressão de contato durante a operação de corte causa desgaste devido à majoração da tensão que ocorre nos grãos abrasivos (diamantes) e na matriz metálica ligante das ferramentas diamantadas. Caso haja uma tensão elevada sobre os cristais de diamante para o compósito metálico, os cristais correm o risco de se soltarem prematuramente da matriz, deixando uma cavidade na matriz metálica.

Tönshoff et al [2001], realizou estudos relativos aos efeitos do tamanho e tipo de diamantes sobre as condições de desgaste das rochas durante corte. Neste sentido conclui que:

- Materiais duros usualmente requerem diamantes pequenos e macios (tenazes), pois a pressão de contato por grão de diamante (partículas) não deve ser alta. É necessária uma intensa remoção de “debris” (detritos);
- Grandes diamantes usados sobre materiais duros limitam a penetração da ferramenta diamantada na rocha e normalmente ocorrerá à perda de diamantes ou surgirão planos de desgaste sobre os diamantes;
- Diamantes cúbicos e octaédricos apresentam alta resistência mecânica e resistência ao desgaste, sendo adequados para o corte de materiais duros, ou quando é necessário ter-se alta taxa de corte/penetração.

Os tipos de diamantes usados na fabricação de ferramenta diamantada são de alta qualidade, são selecionados primeiramente pelas características mineralógicas da rocha, condições de corte, condições operacionais, tal como velocidade de corte, refrigeração e tipo de ferramenta usada. Se os diamantes

apresentam baixa resistência mecânica, neles poderão surgir trincas e provavelmente serão triturados. Se apresentarem resistência elevada e tenacidade, dificilmente irão se fraturar para produzir novas arestas de corte.

Segundo Przyklenk [1993], o desgaste da ferramenta inicia-se através do desgaste da partícula abrasiva, que é responsável pelo corte – nesse caso, o diamante – causando o seu abaulamento (planificação ou embotamento do grão abrasivo). Em seguida, a matriz ligante também sofre um desgaste, diminuindo a área na qual a partícula abrasiva se sustenta sobre tal matriz. Com o aumento deste desgaste até um ponto crítico, a partícula abrasiva se desprende e uma nova camada de partículas abrasivas começa a surgir. Esse desprendimento das partículas para o surgimento de uma nova camada é chamado de “pull-out”.

Segundo Tönshoff et al [2001], o desgaste dos cristais de diamantes pode ser dividido em grupos distintos, baseados em técnicas de análise sucedidas. De acordo com os diamantes após desgaste, os que apresentam a mesma estrutura da Figura 2.24 (a), não revelam danos em sua superfície e estão em sua condição original na matriz metálica, sendo, portanto denominados de intactos ou não desgastados. Em (b), corresponde ao grupo dos diamantes desgastados, por fratura frágil ou lascados, devido ao carregamento térmico seguido por resfriamento rápido, mas também devido a carregamento mecânico. Se os cristais de diamantes são suficientemente friáveis (baixa tenacidade), os diamantes são desgastados até o fim e novas zonas de corte são formadas. Este tipo de desgaste é favorável, desde que novas faces ou arestas de corte (cristais), sejam constantemente geradas. Para os cristais de diamantes cuja estrutura se assemelha a (c), estes correspondem aos que sofreram abrasão, pois devido ao atrito entre os cristais de diamante na matriz com o material a ser cortado, ocorre desgaste mecânico. Então, o material é continuamente removido do cristal de diamante, resultando em uma planificação da zona de corte. Por fim, em (d) representam-se os cristais de diamantes que sofreram destacamento ou “pull-out”, pois, com este tipo de desgaste, ocorre destacamento completo dos cristais de diamante da matriz. As forças de confinamento são insuficientes para reter o cristal na matriz. Neste caso, a matriz tem uma dureza imprópria ou as pressões de contato sobre os diamantes são bastante elevadas, resultando em excessivo desgaste. Estudo posterior [Oliveira, 2009] mostrou que os aspectos microestruturais da Figura 2.24, de a-d, ilustra exatamente a sequência do desgaste ao longo do tempo.

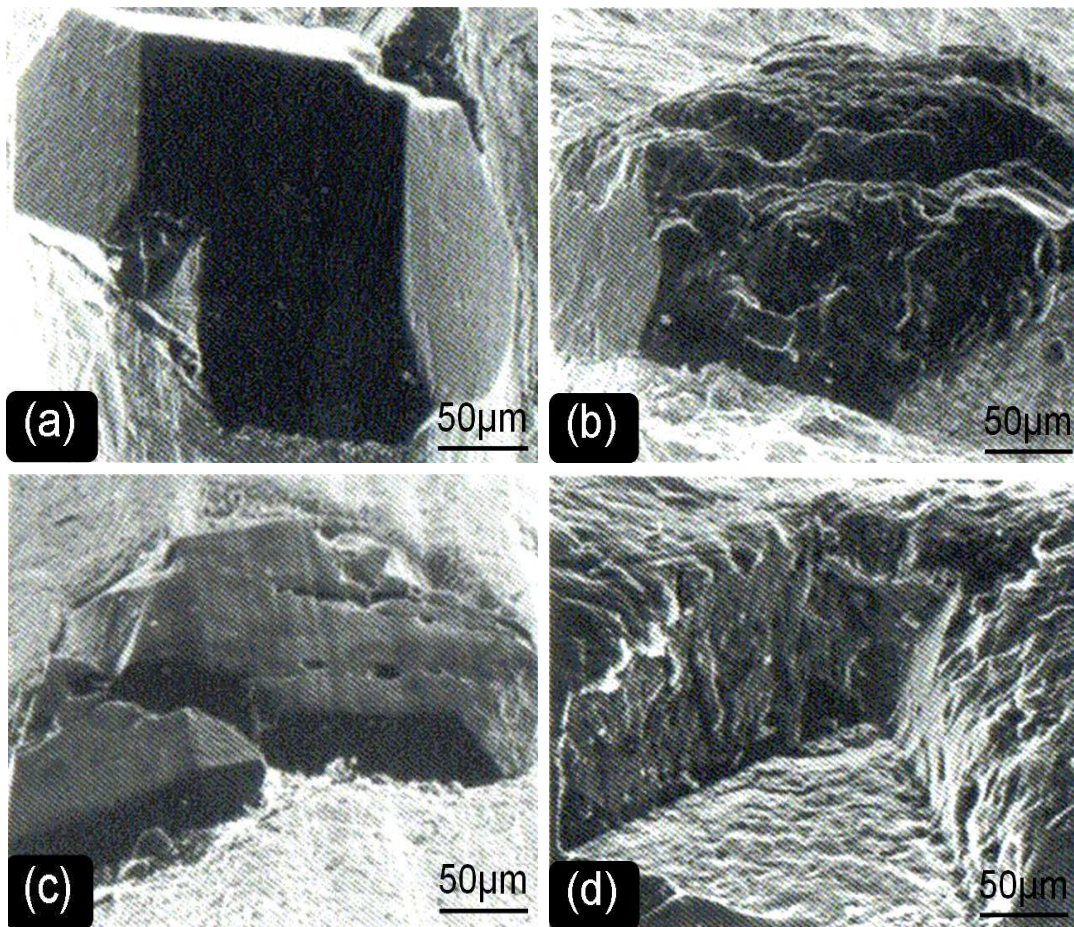


Figura 2.24 – Tipos de desgaste sobre os diamantes: (a) Intacto ou não desgastado, (b) desgastado por fratura frágil (lascado), (c) planificado, (d) destacado ou “pull-out” [Tönshoff et al., 2001].

Tonshoff et al., [2001], investigaram o comportamento de desgaste dos diamantes durante usinagem de aço austenítico com fio diamantado. No ensaio de vida da ferramenta, o comportamento de desgaste do fio foi considerado positivo. Após um tempo de duas horas de corte, foi observado que cerca de 80% dos diamantes estavam na condição de intacto ou clivado, e apenas cerca de 20% dos diamantes não contribuíram de maneira efetiva para o corte. Pode ser observado que a planificação dos cristais de diamantes e também o destacamento (ou pull-out) dos mesmos a partir do ligante, causou uma redução do desempenho de corte. Isso pode ser observado através da análise da Figura 2.25.



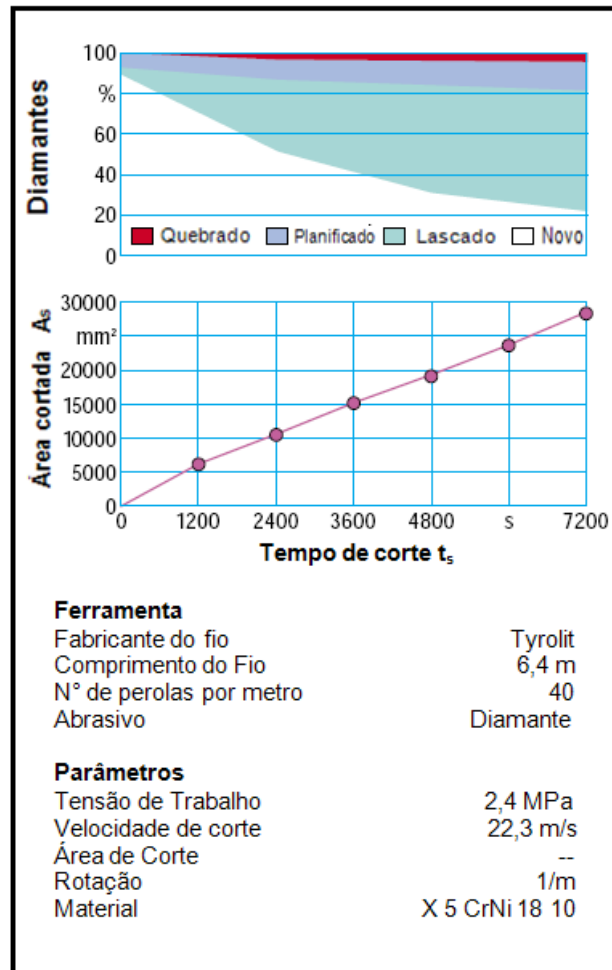


Figura 2.25 – Avaliação do desgaste dos diamantes em usinagem de aço austenítico [Tönshoff et al., 2001].

Diante desta fundamentação apresentada, pode-se observar que houve pouco avanço na última década no tocante ao processamento de ferramentas diamantadas do tipo impregnadas (metalurgia do pó). Assim, o Brasil permanece sendo um típico importador de ferramentas de corte diamantadas, que são fabricadas via Metalurgia do Pó, onde a primeira etapa consiste da mistura de diamante com o pó de metal ligante, seguida de prensagem uniaxial ou isostática a frio da mistura, ou prensagem a quente. Após a sinterização, procede-se com a brasagem (soldagem) dos compósitos diamantados impregnados no tubo metálico, (Aço carbono), obtendo-se as perolas diamantadas. Neste sentido, esta dissertação de mestrado foca o processamento de pérolas diamantadas por prensagem a quente, sinterizando o compósito diamantado no tubo metálico, eliminando o processo de soldagem. Para tal, utilizou-se como matriz ligante o pó comercial da

liga ferrítica DIABASE-V21(Fe-Cu-Co-Sn), empregando-se diamantes de alta qualidade (dureza e tenacidade) com revestimentos de SiC e Ni, visando o ganho em adesão e proteção das partículas abrasivas. Neste contexto, são conduzidos ensaios exploratórios comparativos do material produzido com pérolas diamantadas comerciais (importadas), visando o domínio e próprio desenvolvimento da tecnologia de processamento desta classe de ferramentas.

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – Apresentação

Neste trabalho, é apresentado o processamento e caracterização de pérolas de fios diamantados, as quais foram manufaturadas por prensagem a quente segundo as técnicas da metalurgia do pó, e posteriormente caracterizadas e ensaiadas. A Figura 3.1 mostra o roteiro sucinto do desenvolvimento dos trabalhos.

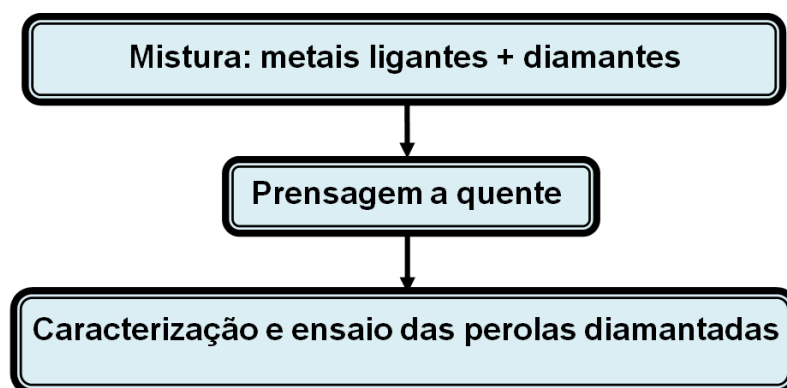


Figura 3.1- Rota Industrial de processamento dos compósitos diamantados via metalurgia do pó.

### 3.2 – Caracterização dos Pós

O pó comercial que é usado neste trabalho é da liga ferrítica DIABASE-V21 (Fe-Co-Cu-Sn). Este é quimicamente pré-ligado (prealloyed) num processo de manufatura onde os elementos constituintes são combinados para produzir uma liga finamente dispersa e extremamente homogênea. O pó metálico foi adquirido da empresa Dr. FRITSCH. Antes de produzir os compósitos diamantados, foi realizada a caracterização das matérias-primas. Com relação à pureza dos pós de metais ligantes e de diamantes, foram feitas as exigências necessárias aos fabricantes/vendedores dos mesmos, principalmente no que tange aos teores de oxigênio, carbono, enxofre, dentre outros elementos. A análise química foi feita via EDX no laboratório de Engenharia Civil – LECIV/CCT/UENF, explicitada na Tabela 3.1. Pode ser notado da tabela abaixo, a presença de poucas impurezas, fator positivo para o sucesso da manufatura do compósito.



Tabela 3.1 – Análise química do pó pré-ligado DIABASE-V21 (fabricado por processo hidrometalúrgico – Dr. FRITSCH) – % em peso.

Elemento Químico	Símbolo	% em peso
Ferro	Fe	61,094
Cobre	Cu	21,212
Cobalto	Co	12,564
Estanho	Sn	2,602
Fósforo	P	1,888
Enxofre	S	0,640

O pó ligante DIABASE-V21 foi submetido a análise de tamanho médio dos aglomerados, obtidos via sedigrafia – a Laser – no Laboratório de Física – LMCME/UFRN e o resultado é apresentado na Tabela 3.2 e Figura 3.2, onde se observa que o tamanho médio de partícula é 27,59  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3.2 – Tamanho médio de aglomerados do pó pré-ligado DIABASE-V21.

Ultrasom	: 60	s
Concentração	: 63	
Diâmetro a 10%	: 9.55	mu
Diâmetro a 50%	: 21.90	mu
Diâmetro a 90%	: 54.47	mu
Diâmetro médio	: 27.59	mu
Fraunhofer		
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 60/60/2	
SOP : Repetibilidade		

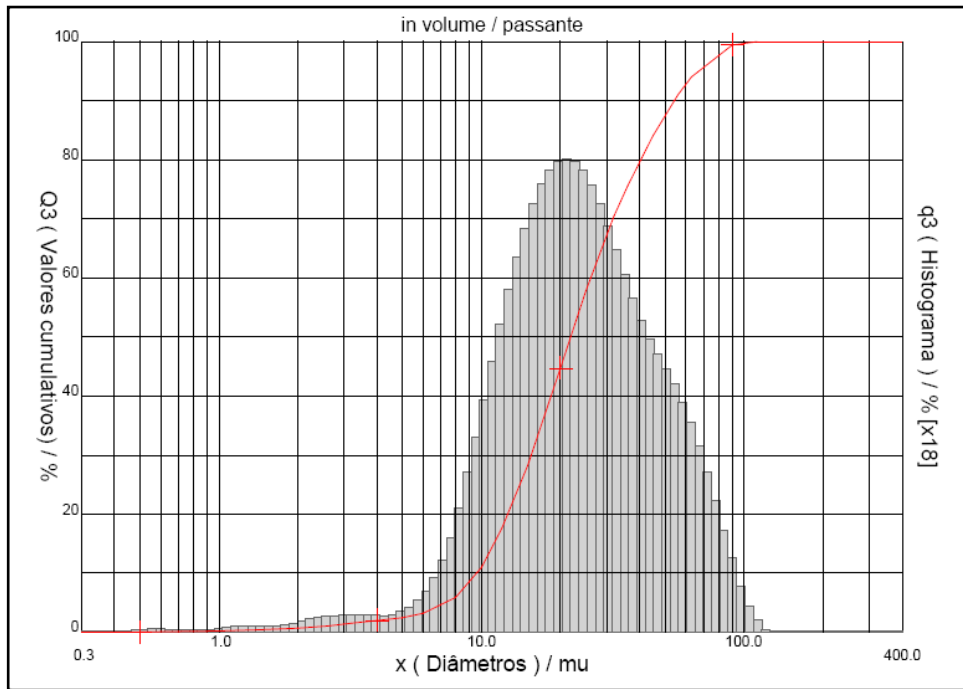


Figura 3.2 - Gráfico do tamanho médio de aglomerados do pó pré-ligado DIABASE-V21.

### 3.3 – Definição da Mistura

A primeira sinterização foi realizada com materiais de baixo custo, como o Ferro puro e areia de rio (sílica), com finalidade de ensaio exploratório. O ferro substituiu a liga metálica comercial DIABASE-V21, e os grãos de areia fizeram a função dos diamantes nas pérolas. Dessa forma, foi possível verificar as dimensões das pérolas, assim como a distribuição dos grãos abrasivos no metal ligante, e a adesão do compósito (ferro+areia) no tubo metálico durante a prensagem a quente. O tamanho médio de partícula do pó de ferro utilizado foi de 89,02  $\mu\text{m}$  e os grãos de areia foram peneirados em peneiras de 40 e 50 mesh, para se atingir a granulometria desejada, ou seja, a que ficou retida na peneira de 50 mesh. Esse procedimento foi usado devido o alto preço dos diamantes e dos pós metálicos usados na fabricação de ferramentas diamantadas.

Após a etapa de ensaio, realizou-se o processamento de pérolas de fios diamantados, com o pó comercial de liga ferrítica DIABASE-V21 (Fe-Cu-Co-Sn), sendo processados via metalurgia do pó (prensagem a quente). Assim, segundo a regra das misturas para sistemas particulados [German, 1992], tem-se, para o cálculo da densidade teórica da matriz metálica ( $\rho_T$ ):

$$\rho_T = \frac{m_L + m_D}{\frac{m_L}{\rho_L} + \frac{m_D}{\rho_D}} \quad (3.1)$$

$$\rho_T = \frac{96 + 4}{\frac{96}{8} + \frac{4}{3,48}}$$

$$\rho_T = 7,604 \text{ g/cm}^3$$

Onde:  $m_L = 96\%$  é a massa do ligante;  $m_D = 4\%$  é a massa do diamante.

Considerando-se a massa total como 100 gramas, de acordo com as estequiometrias da amostra, para efeito de cálculo. A densidade do pó DIABASE V-21 é de  $8,0 \text{ g/cm}^3$  e do diamante,  $3,48 \text{ g/cm}^3$ .

Os diamantes utilizados foram adquiridos da Diamond Inovations (Trademark of General Electric Company, USA), tipo MBS960SI2 – alta tenacidade e resistência ao impacto, com revestimentos de carbetto de silício (SiC) e Níquel (Ni) – para aumentar a adesão na matriz, na granulometria 40/50 mesh ( $425\text{-}300\mu\text{m}$ ), na concentração 50, que se refere a 13% em volume de diamante por  $\text{cm}^3$  ou  $0,44 \text{ gramas de diamante/cm}^3$  (concentração usual de diamantes nas pérolas comerciais – vide Tabela 2.10) – próprio para uso com matriz ferrosa.

### 3.4 - Determinação da Massa por Amostra

A mistura é realizada em misturador industrial para metais e diamantes, fabricado pela Pyramid, durante o tempo de 20 minutos. O teor de diamantes adicionado à liga metálica foi de 4% em peso.

Para calcular o valor da massa necessária para cada amostra, utilizou-se a Equação 3.2, que relaciona o valor da densidade teórica da mistura ( $\rho_T$ ), e o volume do molde de grafite de diâmetro 11mm.

$$\rho_T = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

A mistura foi confinada nas cavidades cilíndricas da matriz de sinterização para a prensagem a quente, conforme descrito em detalhes na seção 3.5. A Figura 3.3 esboça o desenho da futura pérola de fio diamantado. Os dados para calcular o volume de confinamento para uma pérola pode ser observado na Tabela 3.3.

$$V = \frac{\pi[(D)^2 - (d)^2]l}{4} \quad (3.3)$$

$$V = \frac{\pi[(11)^2 - (8)^2]6}{4}$$

$$V = 0,268 \text{ cm}^3$$

Calculam-se o valor da massa para cada amostra utilizando-se a Expressão 3.2 e o valor obtido para o volume. A quantidade necessária em massa de ligante para cada amostra foi de 2,038 g.

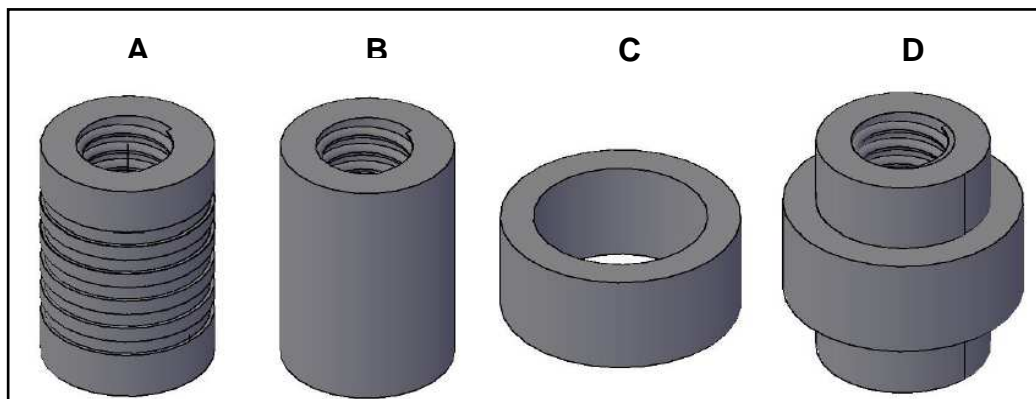


Figura 3.3 – Desenho esquemático das Partes de uma pérola diamantada, produzida por este trabalho: (a) Tubo metálico com canais externo em Aço 1045, (b) Tubo metálico sem canais em Aço 1045, (c) composto diamantado, (d) Pérola diamantada.

Tabela 3.3 – Dados dimensionais da pérola de fio diamantado.

Dados	Pérola (Compósito diamantado)	Tubo Metálico
$\varnothing_e$ (diâmetro externo)	11 mm	8 mm
$\varnothing_i$ (diâmetro interno)	8 mm	5 mm
Comprimento	6 mm	12 mm

### 3.5 – Condição de Sinterização - Prensagem a Quente

Esta é a etapa mais importante do processamento das amostras, onde se garante a forma e tolerância dimensional e a densificação da mistura dos metais ligantes com os diamantes, pelos mecanismos de prensagem e sinterização.

O aparelho de sinterização utilizado no processo é composto por uma caixa retangular externa de aço temperado, uma caixa retangular interna de aço temperado e isolante térmico de alumina, conforme Figura 3.4.

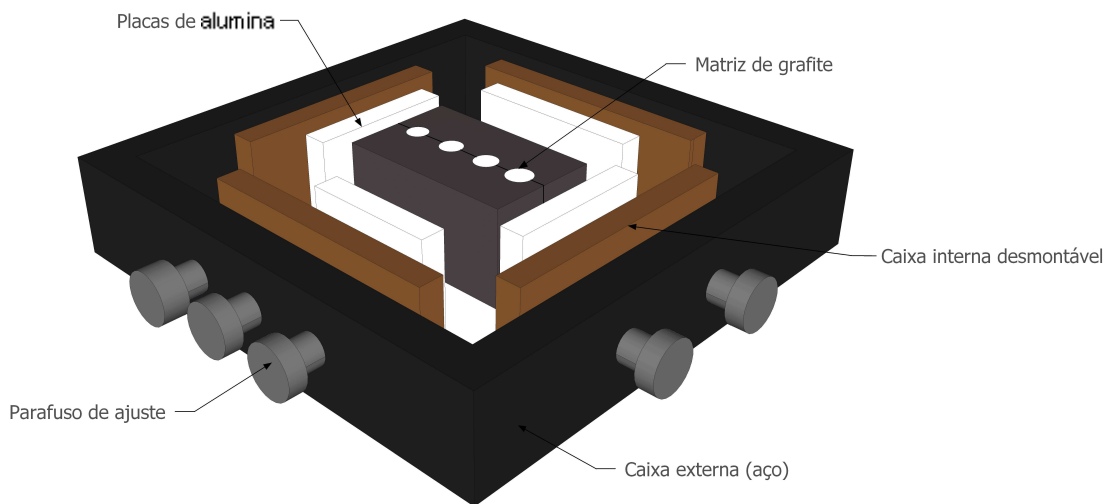


Figura 3.4 – Matriz de sinterização utilizado na prensagem a quente.

As pérolas diamantadas produzidas segundo a rota de prensagem a quente, que é a principal rota industrial da manufatura de ferramentas diamantadas, onde a prensagem dos pós ocorre concomitantemente assistida por temperatura (sinterização). Isso foi feito na prensa a quente industrial – Pyramid, e foram utilizados os seguintes parâmetros:

- $T = 800^{\circ}\text{C}$
- $P = 35 \text{ MPa}$
- $t = 3 \text{ minutos}$

O parâmetro temperatura está baseado no que se utiliza na indústria para a manufatura de compósitos diamantados para serras e pérolas de fios diamantados, por exemplo (800°C a 850°C). Del Villar et al., (2001) mostraram serem esta a pressão e tempo recomendados para a prensagem a quente de compósitos diamantados, justificando serem estes valores mundialmente utilizados, ficando como proposta para trabalhos futuros um estudo da variação da pressão no processamento de ferramenta de corte.

O pó pré-ligado misturado com diamantes é prensado a quente em uma matriz de sinterização de eletrografite com 4 cavidades cilíndricas de diâmetro 11 mm, altura das amostras para aproximadamente 6 mm.

O processo de montagem da matriz de sinterização se inicia com o seu encaixe no interior da caixa retangular externa (caixa em aço), com montagem da caixa retangular interna (barra chata em aço) e pela observação da mesma quanto à fixação dos parafusos, entrada do termopar desimpedida e introdução dos pistões de grafite inferiores nos orifícios da matriz. Em seguida, utilizou-se uma barra de grafite, apoio inferior, com as mesmas dimensões da matriz de sinterização que deve ser posta na parte da prensa onde ocorre a passagem da corrente elétrica de modo que ficasse centralizada. Posteriormente era colocada a matriz de sinterização sobre o apoio inferior, de tal modo que ficasse alinhados e então em cada orifício, contendo os pistões inferiores, adiciona-se os pós misturados com diamante e pesados de acordo com a estequiometria e dimensões desejadas.

E por último, fechavam-se os orifícios preenchidos por pó pelos pistões de grafite superiores, conferindo-se todos os pistões, que se encaixam perfeitamente na matriz de sinterização, e a cubriam com o apoio superior de grafite, verificando se o conjunto estava alinhado e centralizado na prensa.

Após este processo, era colocado o termopar e a prensa era ligada sem carga até atingir a temperatura de 200°C, e acima desta temperatura começava a acrescentar força determinada para o experimento até a matriz de grafite alcançar a temperatura desejada. Após isso se iniciava a sinterização, durante o tempo estipulado devido à passagem de corrente elétrica pelo conjunto, fazendo a matriz de sinterização aquecer e até sinterizar os pós, dependendo da temperatura utilizada.

Os compósitos diamantados foram sinterizados diretamente no tubo metálico (suporte das pérolas de fios diamantados), eliminando o posterior processo de brasagem dos segmentos diamantados. Foram sinterizadas 40 (quarentas) pérolas de fios diamantados para realização deste trabalho.

### **3.6 – Preparação Metalográfica dos Corpos Sinterizados**

Após a etapa de sinterização (prensagem a quente), lixavam-se todos os compósitos diamantados em uma politriz semi-automática, usando lixas de 100 e 220 mesh, com o objetivo de retirar apenas as rebarbas laterais oriundas de fluxo metálico durante a sinterização.

### **3.7 – Ensaio de Cisalhamento**

O ensaio de resistência ao cisalhamento foi empregado para verificar a adesão do compósito diamantado no tubo metálico. Para tal, utilizou-se cilindro metálico com 5 canais externos de 0,20 mm profundidade e espaçamento 1 mm, como também tubos sem canais com rugosidade de  $0,98\mu\text{m}$  (Vide Figura 3.3 e Tabela 3.3).

Os ensaios de cisalhamento foram feitos em um equipamento universal de ensaios mecânicos INSTRON, modelo 5582 – 100 KN de capacidade, usando uma velocidade de 0,10 mm/min, disponível no SEMMA/CCT/UENF.

Foram utilizadas oito (8) pérolas diamantadas produzidas por este trabalho para realizar o ensaio de cisalhamento, sendo quatro (4) sinterizadas em tubos de aço com canais e quatro (4) em tubos de aço sem canais.

### 3.8 – Ensaio de Resistência à Abrasão

As pérolas sinterizadas estudadas neste trabalho, foram submetidas a ensaios de resistência à abrasão. O material para corte era um granito cinza, com estrutura orientada, de granulometria grossa, variando de 4 a 20 mm. Petrograficamente classificado como biotita monzogranito, contendo 32% de quartzo, 31% de microlina micropertítico, 24% de plagioclásio, 11% de biotita e 2% de acessórios. Apresentava massa específica de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , absorção de água de 0,35% e porosidade total de 0,93%. Foi então produzido um disco deste granito com diâmetro externo e interno de 70 e 40 cm respectivamente, com altura de 5 cm. Este disco foi instalado horizontalmente na mesa do Simulador Físico interfaceado com computador tipo AMSLER modificado, microprocessado modelo AB800-E fabricado pela Contenco, disponível no SMSD/LAMAV/UENF, e utilizava o software Pavitest Abrasímetro 2.31 para a obtenção de dados, cuja a foto se encontra na Figura 3.5.

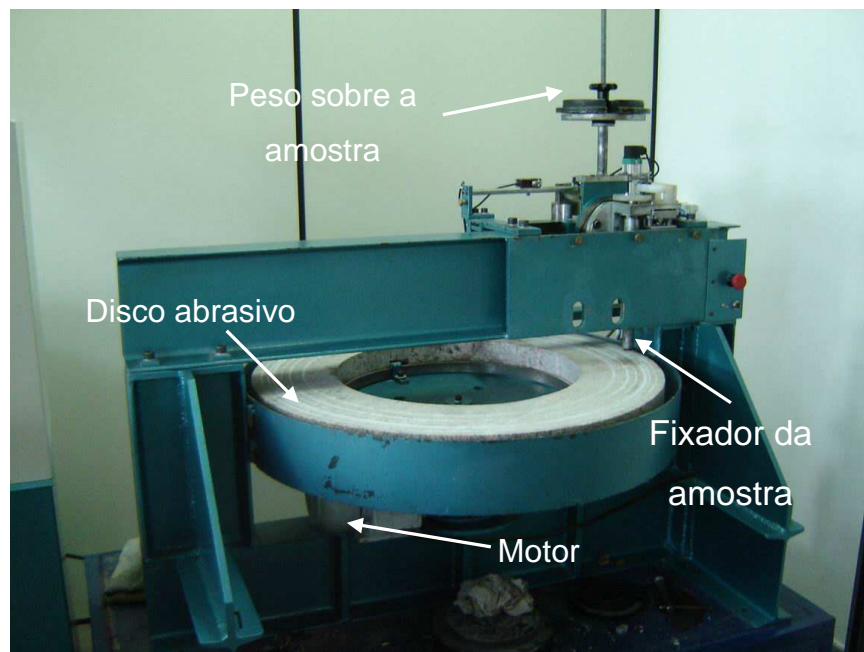


Figura 3.5 – Abrasímetro especial modificado microprocessado.

As amostras foram acopladas verticalmente ao disco de granito em um suporte com fixador.

A rotação visada da mesa de granito foi de 20 rpm, com uma força vertical (peso solto) sobre as amostras de 2 kgf, o que representava as melhores condições de ensaios nesta máquina e para estes materiais, segundo estudos realizados por



Oliveira e Filgueira (2007). Uma vez posicionada sobre o disco de granito, a amostra se mantinha fixa em uma linha de corte.

As amostras foram submetidas a condições bem mais severas que quando em operação de corte nas lavras de rochas ornamentais, pois sob a carga vertical aplicada e as irregularidades do disco de granito geram-se grandes impactos na zona de corte. Os tempos de ensaio foram de 2, 6 e 12 minutos.

As amostras foram pesadas antes e após cada ensaio em balança digital Marte de resolução 0,001g, para medir a variação de massa e determinar a resistência à abrasão das amostras. Isso pode ser determinado através das equações 3.4 e 3.5.

$$\Delta M = \frac{m_I - m_F}{m_I} \times 100 \quad (3.4)$$

onde:  $\Delta M$  é a perda de massa (%);  $m_i$  é a massa inicial e  $m_f$  é a massa final.

$$RA = \frac{1}{\Delta M} \quad (3.5)$$

Onde:  $RA$  é a resistência à abrasão (%).

Após essas medições, foram esboçados gráficos para avaliar a microestrutura de cada tipo de pérola no que tange à classificação defeito no processo de desgaste, em função dos tempos de ensaio de resistência à abrasão.

Para este ensaio foram utilizadas cinco (5) amostras, seja da pérola produzida por este trabalho seja de cada pérola diamantada importada dos seguintes países de fabricação: pérola comercial China, pérola comercial Itália e pérola comercial África do Sul.

### 3.9 – Microscopia Eletrônica de Varredura

Após cada tempo de ensaio de abrasão as amostras foram submetidas a análises da microestrutura no microscópio eletrônico Shimadzu, disponível no LAMAV/CCT/UENF, sendo as imagens geradas a partir de elétrons secundários (SE) com aumentos de 35, 50, 100 e 200x, para definição dos modos de falha, desgaste da matriz, área exposta e distribuição dos cristais de diamante.

### **3.10- Microanálise**

Com o auxílio de um espectrômetro por dispersão de energia de raios-X (EDS), acoplado ao microscópio eletrônico Shimadzu, SSX-550, disponível no LAMAV/CCT/UENF, foi realizada a microanálise pontual, obtendo-se informações sobre a presença de fases e soluções sólidas, composição química da amostra de forma qualitativa e, a distribuição dos elementos químicos presentes através do mapeamento por raios-X característicos dos constituintes metálicos.

### **3.11- Difração de Raios-X (DRX)**

A análise difratométrica das pérolas diamantadas pesquisadas foram efetuadas em um difratômetro do tipo Shimadzu, disponível no LAMAV/CCT/UENF, utilizando filtro de níquel no feixe primário, com uma tensão de 40 Kv e corrente de 30 mA. A varredura foi feita variando  $2\theta$  de 30 a 100°, com passo ( $\Delta\theta$ ) de 0,03 s e tempo de 0,6 s, usando a radiação de Cu-K $\alpha$ .

A determinação das características dos difratogramas e a identificação das fases presentes nas matrizes metálicas foram realizadas com o auxílio do banco de dados cristalográficos do JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standards), versão 2.1 e atualizado em 2000.

### **3.12- Espectroscopia de Raios-X (EDX)**

Para determinar quantitativamente os elementos presentes nas três (03) pérolas diamantadas comerciais pesquisadas foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios-X do tipo EDX-Shimadzu – (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer), disponível no laboratório de Engenharia Civil - LECIV/CCT/UENF.

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados referentes à obtenção e caracterização das pérolas de fios diamantados, produzidas através do processo de sinterização por prensagem a quente. Os ensaios aos quais as amostras foram submetidas têm cunho comparativo entre si.

### **4.1- Pérolas Diamantadas**

As pérolas diamantadas produzidas por este trabalho, foram processadas por prensagem a quente a 35MPa/800°C/3minutos. Utilizou-se pó comercial ferrítico Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21) e diamantes de alta qualidade, granulometria 40/50 mesh (425-300µm). As etapas do processamento são descritas detalhadamente no capítulo 3.5.

Segundo Oliveira e Filgueira [2008], as pérolas diamantadas produzidas industrialmente são sinterizadas sem o suporte (tubo metálico). Em seguida, os compósitos diamantados são brasados no tubo metálico, com solda de prata. A prata (Ag) possui um ponto de fusão superior a alguns materiais, como por exemplo o estanho e, além de ótima adesão com os materiais da pérola diamantada, apresenta melhor fluidez ao longo da interface entre o tubo e a superfície interna da pérola, já que a brasagem é feita apenas ao longo de uma das extremidades.

Os compósitos diamantados das pérolas produzidas por este estudo, foram sinterizados diretamente no tubo de aço. Dessa forma, não se torna necessário o trabalho de soldagem do compósito no suporte metálico. As Figuras 4.1 e 4.2 fornecem uma ampla visão das pérolas produzidas.

A seta tracejada na Figura 4.2, mostra o tubo metálico e a seta continua indica o compósito diamantado, o qual é responsável pela ação de corte.



Figura 4.1 - Pérolas Diamantadas Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), produzidas por este estudo.



Figura 4.2 - Aspecto dimensional das pérolas produzidas por este trabalho com a liga metálica DIABASE-V21 (escala em mm).

## **4.2- Análise Microestrutural do Compósito Diamantado Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21)**

As Figuras 4.3 a 4.6 apresentadas adiante mostram a distribuição dos cristais de diamantes na matriz ligante de Fe-Cu-Co-Sn, bem como alguns fenômenos do comportamento dos diamantes no compósito durante o trabalho de corte.

Na Figura 4.3, observa-se a distribuição uniforme dos cristais de diamante na matriz metálica, que contribui para retenção dos diamantes durante o trabalho de corte da pérola de fio diamantado, após ensaio de resistência à abrasão de 2 minutos.

Pode-se perceber também que, além da boa distribuição dos cristais, os mesmos apresentam diferentes alturas de protrusão (altura exposta do diamante), sendo mais marcante esta característica à medida que aumenta o tempo de ensaio de abrasão do compósito. Foi possível observar que os diamantes apresentavam poucos defeitos, indicando início do processo de corte. Além disso, pode ser visto a boa ancoragem dos cristais de diamante na matriz metálica, que é um fator positivo e determinante para desempenho e vida útil da ferramenta diamantada.

A Figura 4.4, apresenta uma foto da matriz metálica desgastada após ensaio, onde os diamantes foram descobertos e surgiram as faces cortantes, que são favoráveis ao processo de corte da rocha. Com o decorrer do ensaio de resistência à abrasão, os cristais de diamante desgastados ou sem capacidade de corte eram liberados e novos cristais surgiam para dar continuidade ao processo (vide setas na Figura 4.4). A matriz metálica deve segurar os cristais de diamantes, evitando o desprendimento prematuro durante o trabalho de corte.

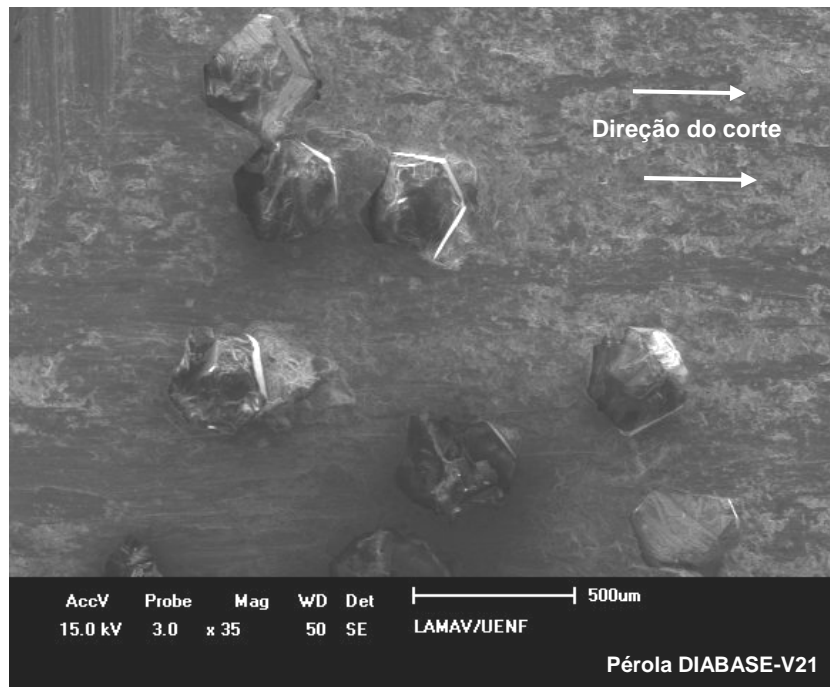


Figura 4.3 - Distribuição dos cristais de diamante na matriz ligante Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21) após ensaio de Resistência à abrasão, durante 2 minutos.

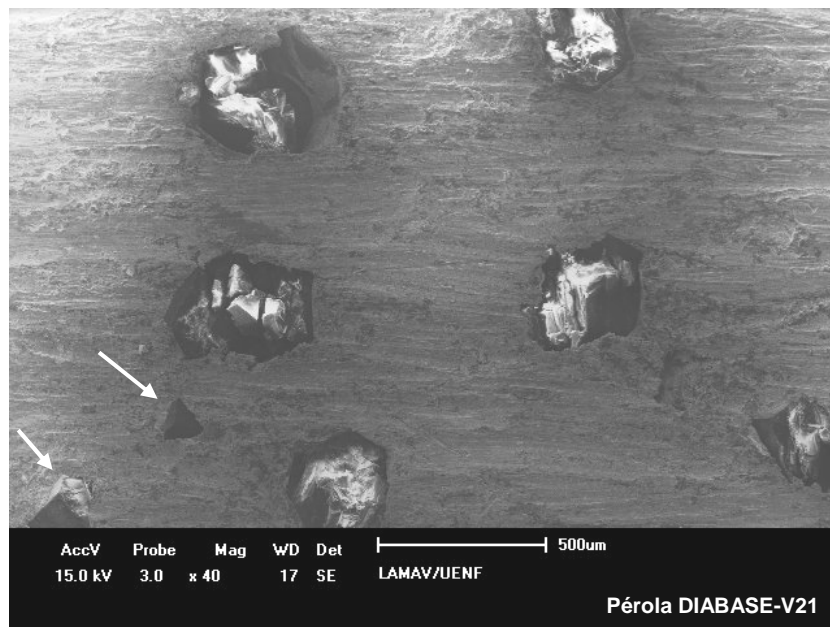


Figura 4.4 - Desgaste do compósito DIABASE-V21 e surgimento de diamantes com diferentes tamanhos de área exposta, após 6 minutos de ensaio.

Como já mencionado no Capítulo 2 deste trabalho, as ferramentas diamantadas estão expostas às severas condições de corte, sendo as cargas normais à superfície de desgaste normalmente altas, causando desgaste da partícula abrasiva e da matriz ligante. Neste sentido, o ensaio de resistência à abrasão das pérolas de fio diamantado foi realizado em abrasímetro modificado utilizando um disco de granito de granulometria grossa, onde as condições de corte foram mais severas que quando em operação de corte em lavra de rochas ornamentais. Em tal ensaio foi aplicada uma elevada carga vertical sobre as amostras, bem como a irregularidade na superfície do disco de granito, gerando-se maiores impactos durante a operação de corte. Esse comportamento durante o processo de corte, pode afetar negativamente a vida útil da ferramenta, causando o desgaste por fratura frágil ou a “quebra” prematura dos cristais de diamantes (vide Figura 4.5). Pode-se perceber que o monocristal de diamante desgastou alguns vértices, outros se encontram intactos e clivados. Não é comum a ocorrência desse fenômeno nos primeiros minutos de corte nas pedreiras, pois a máquina tensiona o fio diamantado de forma gradativa até a carga determinada e, ao mesmo tempo, faz com que este último gire, alcançando a velocidade de corte.

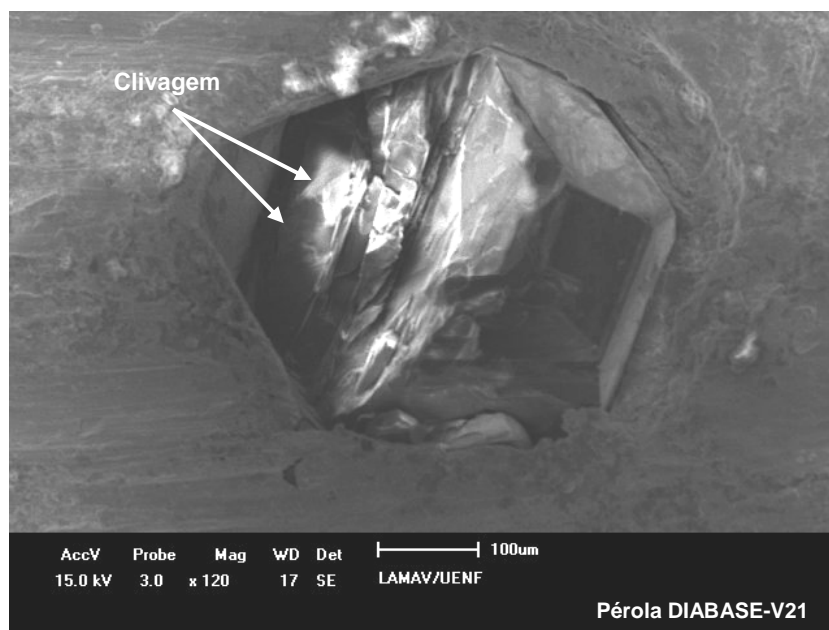


Figura 4.5 - Micrografia do diamante clivado (quebrado) do compósito DIABASE-V21, após 2 minutos de ensaio de desgaste por abrasão.

Na Figura 4.6, observam-se as morfologias do desgaste dos cristais de diamante em estágio diferentes. Pode-se identificar a formação de aberturas (gap) oriundas de fadiga de contato, gerada pelos carregamentos térmicos e mecânicos. A clivagem neste diamante é evidente, sendo favorável para o processo de corte, devido às inúmeras faces cortantes e maior altura de proeminência. Nesta mesma micrografia, observa-se o destacamento de um cristal de diamante da matriz ligante, culminando com o fechamento de um “buraco”, sendo esse fenômeno chamado de “pull-out” (círculo da Figura 4.6). Ao mesmo tempo, novos diamantes intactos que estavam no interior da matriz surgem com novas faces cortantes, proporcionando o processo de desgaste contínuo de uma ferramenta diamantada (seta tracejada da Figura 4.6). Uma retenção inadequada ou ruim dos cristais de diamante é um dos principais fatores negativos que diminui a vida útil e desempenho de uma ferramenta de corte, elevando os custos operacionais. Desta forma é de fundamental importância a seleção de um ligante adequado, de acordo com abrasividade e dureza da rocha a ser cortada, como também, para adesão dos diamantes e equilíbrio da taxa de desgaste da matriz metálica.



Figura 4.6 - Micrografia mostrando vários estágios de desgaste do composto diamantado DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.



### 4.3- Espectroscopia de Raios-X (EDX)

As amostras foram submetidas ao ensaio de análises química via EDX – Shimadzu – (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer), na superfície das pérolas diamantadas para a definição dos elementos presentes. Os resultados são mostrados na Tabela 4.1, e no Apêndice A, Figuras 1, 2 e 3.

Tabela 4.1- Resultados de análise química da matriz ligante das pérolas comerciais, obtidos via EDX.

Pérola Comercial África do Sul		Pérola Comercial Itália		Pérola Comercial China	
Elementos	% em peso	Elementos	% em peso	Elementos	% em peso
Cu	45,669	Co	58,030	Fe	72,704
Fe	35,123	Fe	21,331	Ni	10,642
Zn	15,115	W	11,501	Cu	8,105
Sn	3,006	Cu	4,640	Zn	4,873
Ni	1,088	Ag	4,498	Sn	3,487
-	-	-	-	Mn	0,189

Interessante observar que, para pérola comercial Itália, o tungstênio presente não se refere a tungstênio metálico puro, trata-se de WC – carbeto de tungstênio conforme descrito na revisão bibliográfica - Capítulo 2.3. Sendo assim, importante informar que a técnica de EDX não diferencia o metal tungstênio puro de seu carbeto (ligado ao carbono-C). Assim, faz-se necessário a realização de ensaio de difração de raios-X (DRX) para dar garantias de que se trata realmente de WC.

As características dos elementos selecionados, presentes na composição das pérolas de fio diamantado, podem ser visto na referência Callister [2008] através da Tabela 1, Apêndice B.

### 4.4- Análise Estrutural

A Difração de Raios-X (DRX) é uma técnica usada para a determinação de estruturas presentes nos compósitos diamantados, a qual foi realizada após 6 minutos do ensaio de resistência à abrasão das amostras. Desta forma, se obteve

uma geometria plana na superfície do compósito das pérolas de fio diamantado, sendo favorável a causar feixes difratados durante o ensaio de difração de raios-X.

O difratograma da amostra DIABASE-V21 e a pérola comercial China, apresentaram o background pouco ruidoso e consideráveis intensidades em relação às demais amostras estudadas. Sendo comparados os difratogramas encontrados com os padrões cristalográficos presentes no software PCPDWIN Fichas JCPDS (versão 2.1 e atualizado em 2000), para identificação dos picos apresentados na análise qualitativa por difração de raios-X das pérolas diamantadas.

#### 4.4.1- Difratograma da liga Metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21)

O difratograma da pérola de fio diamantado Fe-Cu-Co-Sn-Diamante está apresentada na Figura 4.7, evidenciando a presença predominante das soluções sólidas  $\text{Co}_3\text{Fe}_4$ ,  $\text{Fe}_4\text{Cu}_3$  e  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ .

Segundo Callister [2008], uma solução sólida se forma à medida que os átomos de soluto (elemento de menor concentração) são adicionados ao material hospedeiro “solvente” (elemento de maior concentração). Dessa forma, a estrutura cristalina é mantida e nenhuma nova estrutura é formada.

O Ferro e Cobalto têm os seus respectivos pontos de fusão superiores à temperatura de sinterização usada neste trabalho, porém a afinidade dos elementos e a solubilidades de um para com o outro, vista no diagrama de fases (Apêndice C, Figura 1), faz com que os mesmos sinterizem por meio de uma solução sólida, sendo mais prováveis de ocorrerem em maiores quantidades nas ligas Fe-Cu-Co. Existe uma pequena diferença entre os diâmetros atômicos de Fe e Co, 0,124 e 0,125 nm respectivamente, isso pode contribuir para a formação de soluções sólidas substitucionais de Fe-Co.

Na Figura 4.7, a alta solubilidade entre Fe e Co e a prensagem a quente à temperatura de 800°C, parâmetro baseado no que se utiliza na indústria para fabricação de pérolas de fios diamantados, podem ter contribuído para a formação desta fase dura de CoFe [Kittel, 2006].

O tamanho atômico dos elementos Fe, Cu e Co (0,124 nm, 0,128 nm e 0,125 nm, respectivamente) deve ser levado em consideração, pois quantidades apreciáveis do soluto podem ser acomodadas na solução sólida somente quando a

diferença entre os raios atômicos dos dois tipos de átomos é menor do que aproximadamente  $\pm 15\%$ . De outra forma, os átomos do soluto irão criar distorções substanciais na rede cristalina e uma nova fase irá se formar [Callister, 2008].

A presença de solução sólida  $\text{Fe}_4\text{Cu}_3$  é caracterizada pela elevada solubilidade do cobre em ferro. Isto pode ser verificado mediante análise do diagrama de fases do sistema Cu-Fe, na referência ASM Handbook [1973], através do Apêndice C, Figura 2.

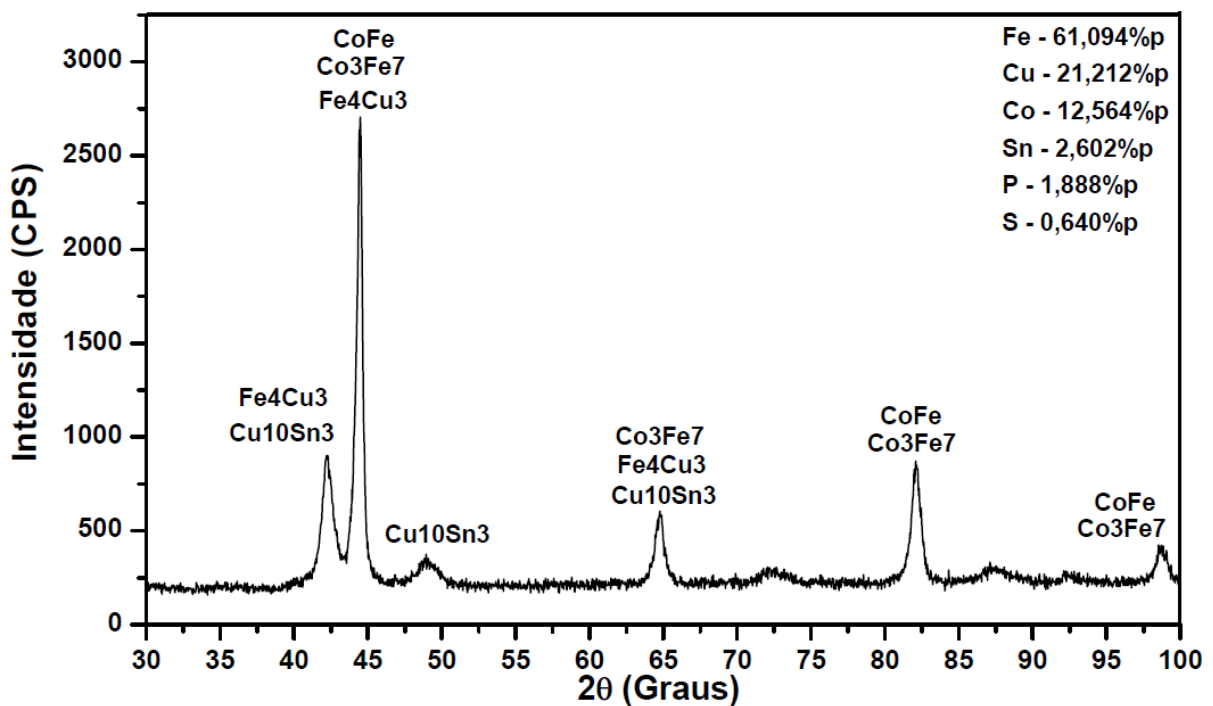


Figura 4.7- Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada processada com a liga DIABASE-V21 por prensagem a quente ( $T = 800^\circ\text{C}$ ,  $P = 35\text{MPa}$ ,  $t = 3$  minutos).

Interessante observar que, para esta liga, existe uma rica participação da solução sólida  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$  (bronze), nos ângulos  $2\theta$  de  $42,259^\circ$ ;  $48,954^\circ$  e  $64,717^\circ$ . Os átomos de estanho são relativamente grandes em comparação com os átomos de cobre, mas apesar disso possuem solubilidade relativamente elevada no cobre, para o intervalo de temperatura entre  $300$  e  $800^\circ\text{C}$ , conforme pode ser visto no digrama de fase Cu-Sn (Apêndice C, Figura 3). Esta solubilidade do estanho no cobre diminui acentualmente com o decréscimo da temperatura, abaixo de  $300^\circ\text{C}$ . Neste diagrama, na temperatura de  $800^\circ\text{C}$ , observa-se uma extensa presença de líquido, formada pelo estanho, e a formação da solução sólida. Além disso, pode-se ter ocorrido precipitados de  $\eta'$ ,  $\epsilon$  e  $\delta$ .

O difratograma desta análise é bem similar àquele descrita no trabalho de Barbosa [2008]. A Tabela 1, Apêndice D, apresenta os resultados obtidos pela difração de raios-X da Liga DIABASE-V21 e a identificação das fases presentes pelos cartões do JCPDS (Apêndice D, Figura 1).

#### **4.4.2- Difratograma da liga Metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (Pérola Comercial China)**

A Tabela 2, Apêndice D, apresenta os resultados obtidos pela difração de raios-X da pérola comercial China (72,704%Fe-10,642%Ni-8,105%Cu-4,873%Zn-3,487%Sn-0,189%Mn) e a identificação das fases presentes. O resultado da análise, Figura 4.8, revelou a presença majoritária das soluções sólidas  $Fe_4Cu_3$  e NiSn (HC).

Pela comparação da pérola comercial China com a pérola comercial Itália, pode-se observar o elevado teor de ferro na composição e a ausência de Cobalto em sua liga.

Na Figura 4.8, no ângulo  $2\theta$  de  $44,365^\circ$ , verifica-se um pico definido como  $FeNi_3$ . Neste caso, existe uma diferença pequena entre os diâmetros atômicos de Fe e Ni, 0,124 e 0,125 nm, espera-se que isso possa contribuir para a formação de solução sólida Fe-Ni.

Os picos representados por NiSn ( $44,365^\circ$ ,  $81,623^\circ$  e  $98,361^\circ$ ) é caracterizado pela solubilidade do estanho em níquel, cerca de 12%p para temperatura de  $800^\circ$  vista no diagrama de fases Ni-Sn (Figura 4, Apêndice C). Observa-se a presença de líquido, formado pelo estanho, e formação de solução sólida. Além disso, pode-se ter ocorrido precipitados de  $\beta'$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ .

O pico de ângulo de  $2\theta$  de  $42,316^\circ$ , verifica-se um pico definido como  $Cu_{0.64}Zn_{0.36}$  (CFC). Neste caso, a solubilidade do Zn em Cu favorece a formação de solução sólida, conforme será explanado no item 4.4.3.

A análise do difratograma da Figura 4.8 revelou picos de  $Fe_4Cu_3$ , similar ao difratograma da pérola comercial África do Sul, nos ângulos  $2\theta$  de  $44,365^\circ$ ,  $64,548^\circ$  e  $81,623^\circ$ . Sendo assim, a explicação sobre esta solução sólida no item 4.4.3 pode ser usada para pérola comercial China.

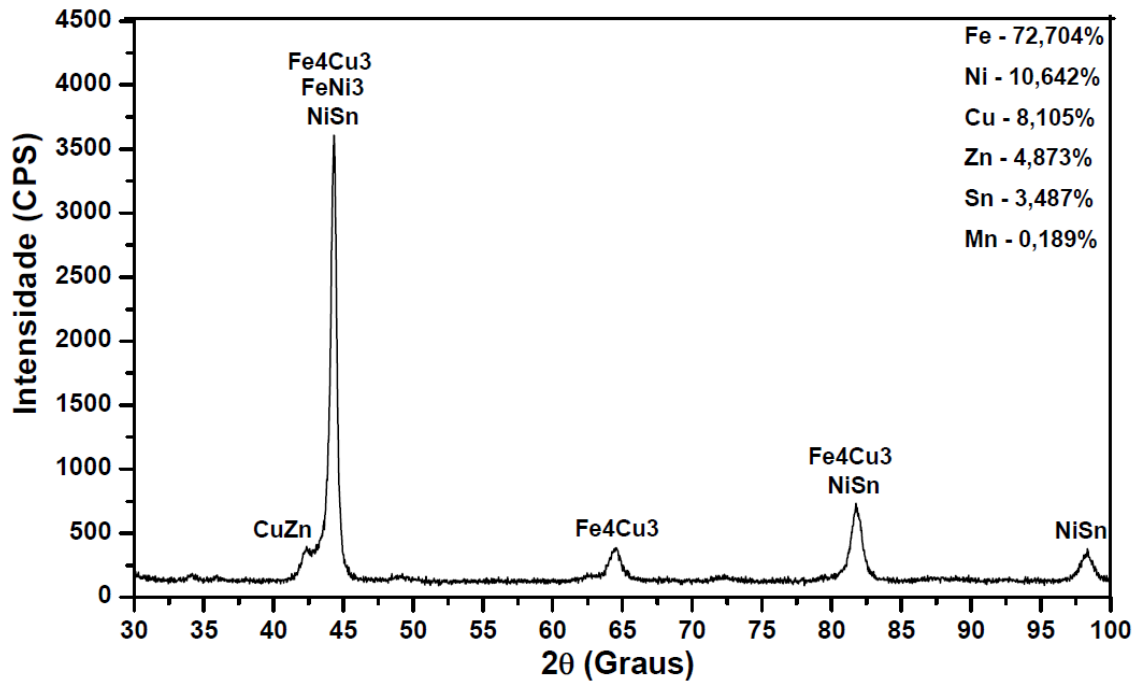


Figura 4.8 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial China.

É muito importante informar que a técnica de difração de raios-X não capta elementos em percentual inferior a 3%. Dessa forma, é possível afirmar que não há pico do elemento manganês (Mn) devido o baixo percentual na liga.

As fichas de padrões cristalográficos retirados do software JCPDS, para análise da pérola comercial China, está apresentado no Apêndice D, Figura 2.

#### 4.4.3- Difratoograma da liga Metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul)

A Figura 4.9 mostra a difratograma da pérola comercial África do Sul 45,669%Cu-35,123%Fe-15,115%Zn-3,006%Sn-1,088%Ni, a qual é composta pelas soluções sólidas NiSn, Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, FeSn<sub>2</sub>, CuZn, FeZn<sub>15</sub> e a fase sólida Fe (CCC).

Na Tabela 3, Apêndice D, estão apresentados os resultados obtidos pela difração de raios-X do compósito da pérola comercial África do Sul e a identificação das fases presentes.

Em comparação com a liga DIABASE-V21, observa-se na Figura 4.9 a presença da solução sólida CuZn (latão), nos ângulos  $2\Theta$  de 40,082°; 41,700°; 44,350°; 72,230°; 76,847°; 87,112°, uma vez que esta liga não apresenta Cobalto (Co) em sua Composição.

A alta solubilidade do zinco em cobre pode ser vista no diagrama de fases Cu-Zn, Figura 5, Apêndice C. Pode-se observar a solubilidade do zinco no cobre de 34 a 38%p, para o intervalo de temperatura entre 800 e 450°C, e uma microestrutura que consiste em uma única fase  $\alpha$ , além disso, pode-se ter ocorrido precipitado de  $\beta'$  e  $\gamma$ . Entretanto, o zinco possui rede cristalina hexagonal compacta (HC), ao contrário do cobre, que é de rede cristalina cúbica de face centrada (CFC).

Espera-se que a pequena diferença entre os diâmetros dos átomos de Cu e Zn, cerca de 4%, respectivamente, contribua para a formação de soluções sólidas de Cu-Zn, como pode ser visto no difratograma desta análise.

Muitas reações no processo de fabricação de ligas dependem da transferência de massa, seja no interior de um sólido específico, ou a partir de uma fase líquida, de um gás ou de duas fases sólidas. Isto é realizado obrigatoriamente através da difusão, que é um fenômeno de transporte de material através do movimento dos átomos [Callister, 2008].

Na Figura 4.9, nos ângulos  $2\Theta$  de 41,700° e 48,110°, verifica-se os picos definido como FeZn<sub>15</sub>. Neste caso, através do diagrama de fases Fe-Zn (Apêndice C, Figura 6), observa-se a excelente solubilidade do Zn em Ferro a 800°C, como também a presença de líquido, formada pelo zinco e a formação de solução sólida. Além disso, pode-se ter ocorrido precipitados de  $\delta$  e  $\epsilon$ .

Em comparação com a liga DIABASE-V21, observa-se a similaridade da solução Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, nos ângulos  $2\Theta$  de 44,350° e 64,664°. Analisando o diagrama de fases Cu-Fe (Apêndice C, Figura 2), a solubilidade do cobre em ferro é da ordem do dobro da solubilidade do ferro em cobre, formando solução sólida.

Os picos referentes ao ângulo de 31,324° (NiSn) e 35,426° (FeSn<sub>2</sub>) são caracterizados pela baixa intensidade, provavelmente pelo menor teor destes elementos na liga.

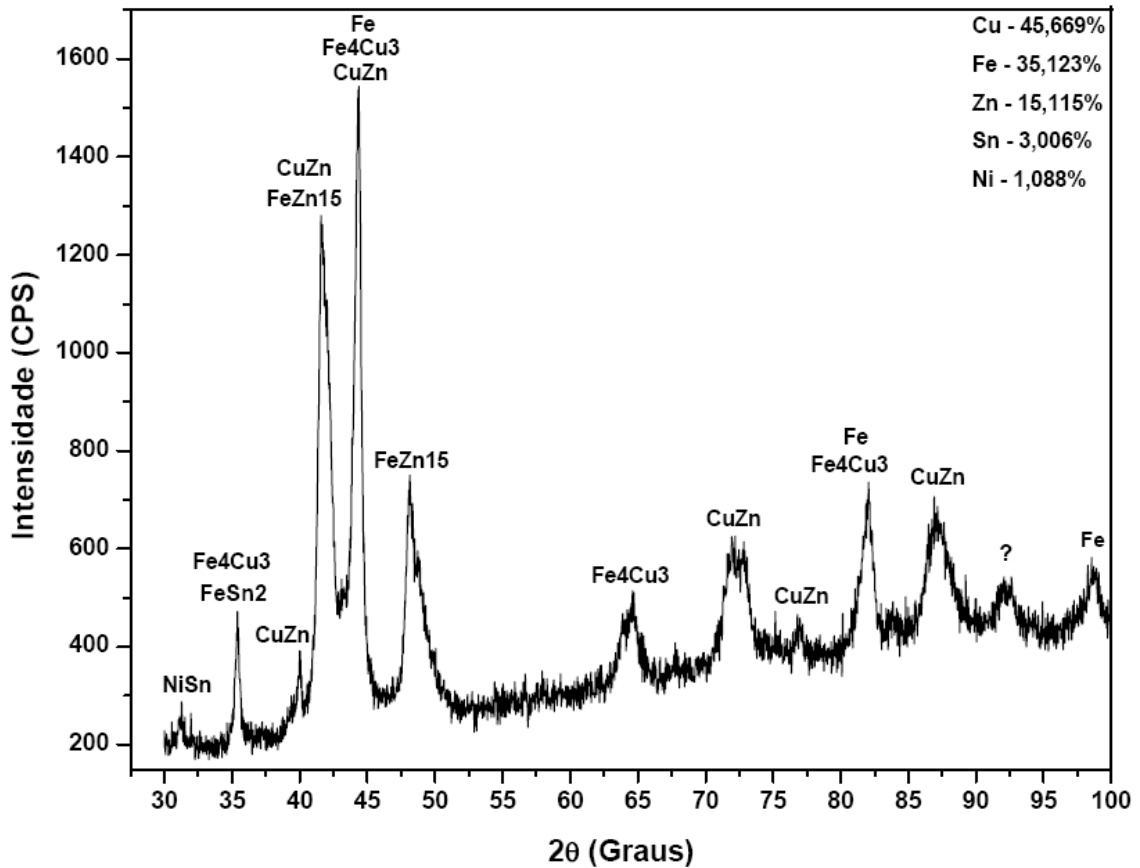


Figura 4.9 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial África do Sul.

As fichas dos padrões cristalográficos retirados do software JCPDS, para análise da pérola comercial África do Sul, são apresentadas no Apêndice C, Figura 3 e 4.

#### 4.4.4- Difratoograma da liga Metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)

A análise do difratoograma da pérola comercial Itália revelou maiores quantidades de solução sólida. Normalmente, as soluções sólidas formadas durante o processo de sinterização fornecem dureza à liga metálica.

A Tabela 4, Apêndice D, apresenta os resultados obtidos pela difração de raios-X da liga da pérola comercial Itália 58,030%Co-21,331%Fe-11,501%W-4,640%Cu-4,498%Ag e a identificação das fases presentes. O resultado da análise,

Figura 4.10, revelou a presença de soluções sólidas CuFe, CoCu, Co<sub>3</sub>Fe<sub>7</sub>, Cu<sub>40</sub>Fe<sub>60</sub>, Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, Co<sub>7</sub>Fe<sub>3</sub> (CFC) e fases sólidas WC (HC) e Ag.

Os picos de ângulo de  $2\theta$  de  $43,801^\circ$  e  $64,272^\circ$  revelaram como uma solução sólida Co<sub>0.52</sub>Cu<sub>0.48</sub> (CFC). Esta análise pode ser feita observando o diagrama de fases Co-Cu (Figura 7, Apêndice C), sendo este sistema bastante similar ao Fe-Co. Neste diagrama, observa-se a solubilidade do cobre em cobalto três vezes maior que a recíproca.

O elemento tungstênio identificado pela análise química via EDX, trata-se do composto WC- carbeto de tungstênio, conforme análise do difratograma da pérola comercial Itália, apresentado na Figura 4.10. Existem diagramas de fases Fe-W e Co-W, porém não foram localizadas fichas de padrões cristalográficas em radiação de Cu-K $\alpha$ .

Na Figura 4.10 pode-se claramente notar a presença de soluções sólidas FeCo e FeCu, porém a solubilidade do cobalto no ferro é maior do que a do cobre no ferro. Esse comportamento é perfeitamente observado na referência ASM HANDBOOK, [1973] (Figuras 1 e 2, Apêndice C).

Vale ressaltar que a formação da solução sólida FeCo, a qual é responsável pela dureza e resistência à abrasão da liga, é facilitada pela presença da fase líquida do cobre, o qual colabora para difusão atômica dos elementos Fe e Co durante a sinterização [Del Villar et al, 2001; Barbosa, 2008]. Entretanto, foi verificado no difratograma da pérola comercial Itália uma pequena quantidade da fase dura CoFe provavelmente o baixo teor de Cu não proporcionou a formação desta solução sólida.

Os picos  $2\theta$  de  $39,098^\circ$  e  $81,637^\circ$ , revelou a presença de prata (Ag) com baixa intensidade. Cabe ressaltar que foi verificado a existência de diagrama de fases Fe-Ag, porém não ocorreu formação dessa solução sólida no difratograma da pérola comercial Itália.

O difratograma apresentado na Figura 4.10, foi analisado de acordo com as fichas de padrões cristalográficos retirados do software JCPDS, evidenciadas no Apêndice D, Figura 5 e 6.



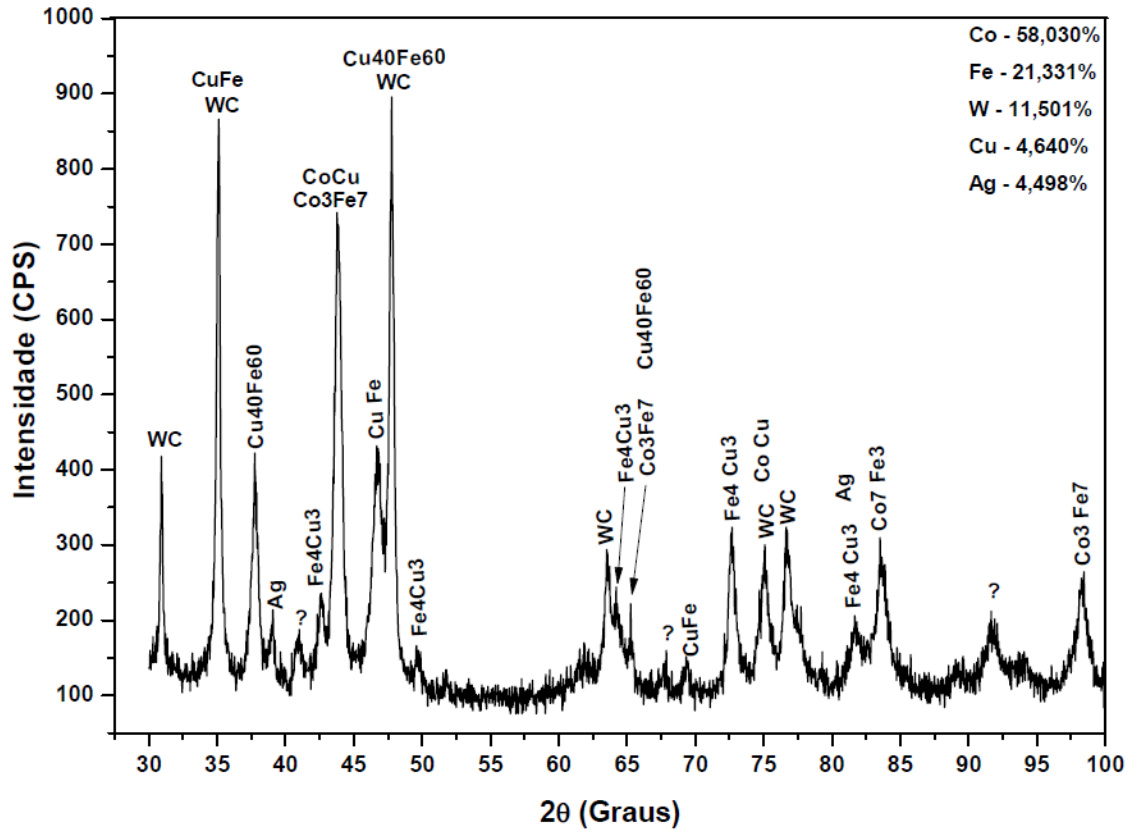


Figura 4.10 - Difratoograma de raios-X obtido na análise da pérola diamantada comercial Itália.

#### 4.5- Espectrometria por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) das Pérolas Estudadas

As distribuições de elementos químicos em diferentes regiões das ligas metálicas foram determinadas pela técnica de espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), sendo realizada microanálise de modo pontual e mapeamento por raios-X, das pérolas à base de DIABASE-V21 e pérolas diamantadas comerciais.

#### 4.5.1- Compósito diamantado Fe-Cu-Co-Sn (Pérola DIABASE-V21)

A microestrutura da liga Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), com a identificação das regiões onde foi realizada análise por EDS pontual, é observada através da Figura 4.11. De forma detalhada, as Figuras 4.12 a 4.15 apresentam os espectros de emissão característica de raios-X desta liga.



Figura 4.11 - Microestrutura da liga Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), com identificação da região da microanálise pontual por EDS.

Os resultados da análise química quantitativa da liga Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente aos pontos 1, 2, 3 e 4 da Figura 4.11, são apresentados na Tabela 1 do Apêndice E. A presença de oxigênio para todos os pontos nesta liga, está relacionada à formação superficial de óxidos de Fe, Cu, Co na superfície da amostra durante contato com o ar atmosférico. O ponto 1, região rica em carbono, indicando a presença de um cristal de diamante, ponto 2, região rica em Fe e Cu, sugere a formação de  $Fe_4Cu_3$  (conforme estudos de DRX). No ponto 3 e 4, revela a matriz rica em Fe, o que é de se esperar, posto que se trata de uma liga com 61,094% em peso de ferro. Todos os elementos não compatíveis com a composição da liga tais como Si e Ca, são possivelmente oriundos da rocha na qual se realizou o ensaio abrasivo.

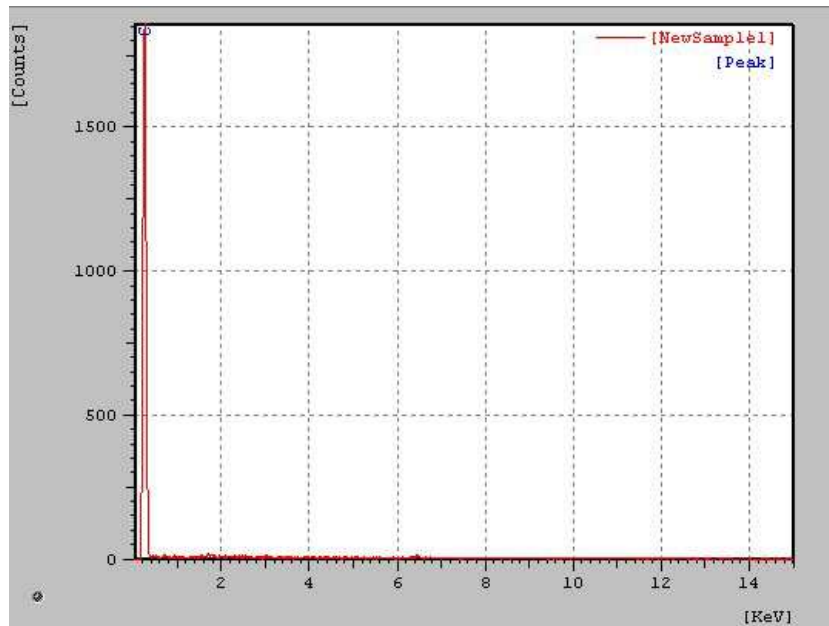


Figura 4.12 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 01(Figura 4.11).

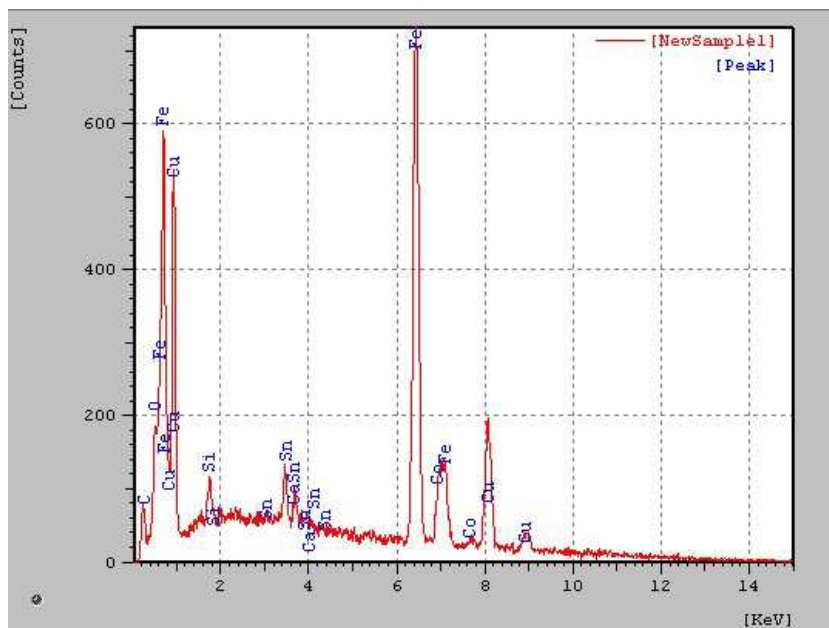


Figura 4.13 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 02 (Figura 4.11).

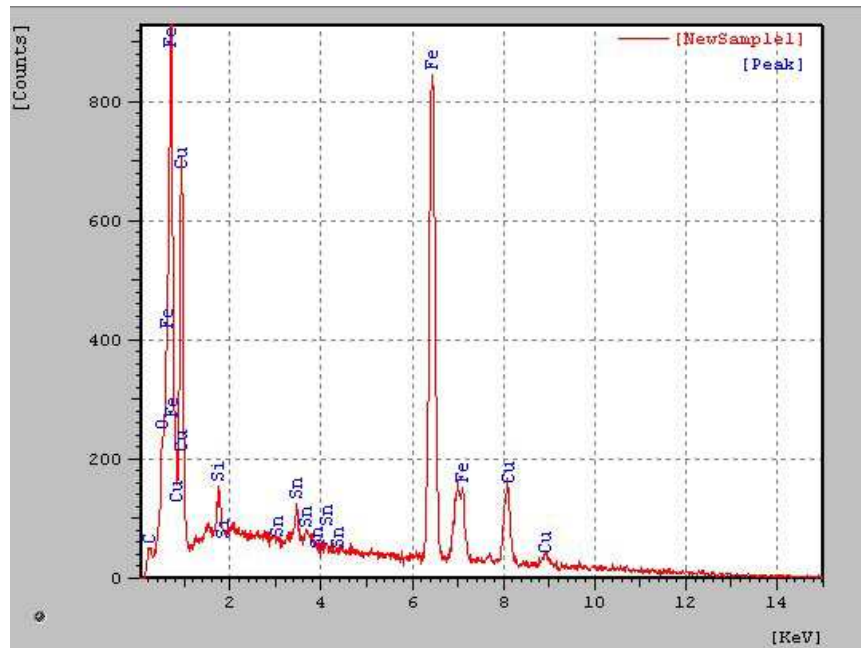


Figura 4.14 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 03 (Figura 4.11).

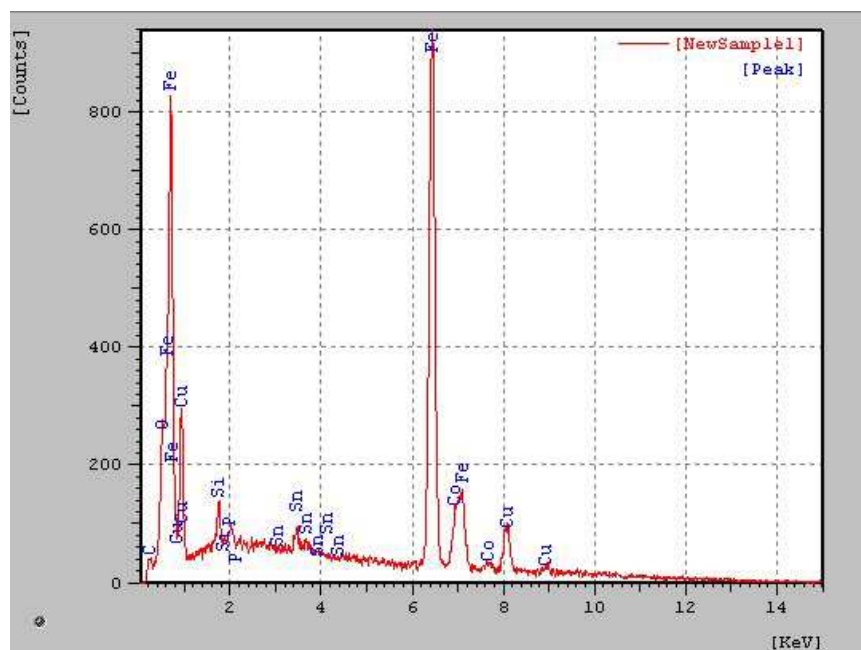


Figura 4.15 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), referente ao ponto 04 (Figura 4.11).

A análise de EDS da liga Fe-Cu-Co-Sn, com os picos característicos dos elementos presentes é mostrada na Figura 4.16. A Figura 4.17 demonstra o mapeamento característico desta liga, comprovando os resultados obtidos pelo ensaio de Difração de Raios-X (DRX). Além disso, observa-se que os elementos estão homogênea e bem distribuídos na matriz ligante. O elemento majoritário do compósito é caracterizado pelo maior contraste (Figura 4.17 c).

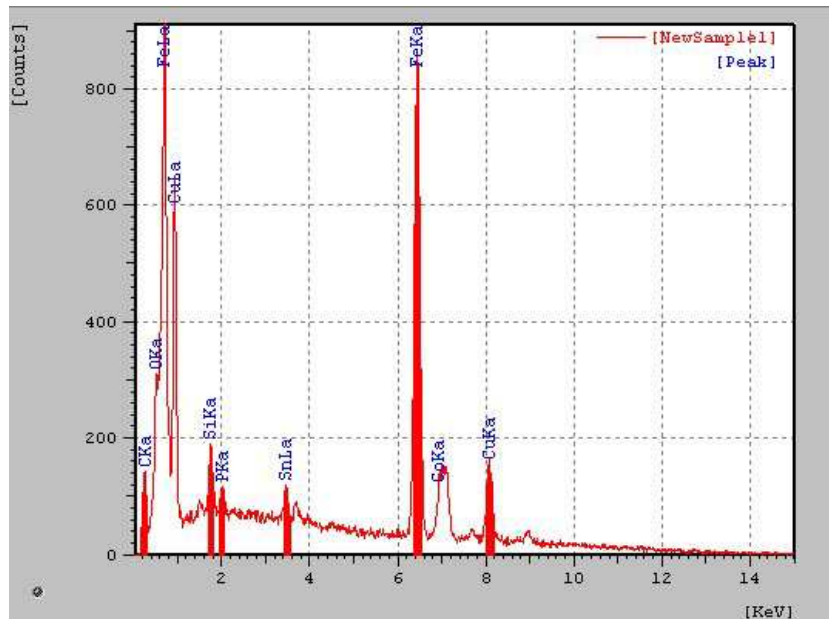


Figura 4.16 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Fe-Cu-Co-Sn (Diabase-V21).

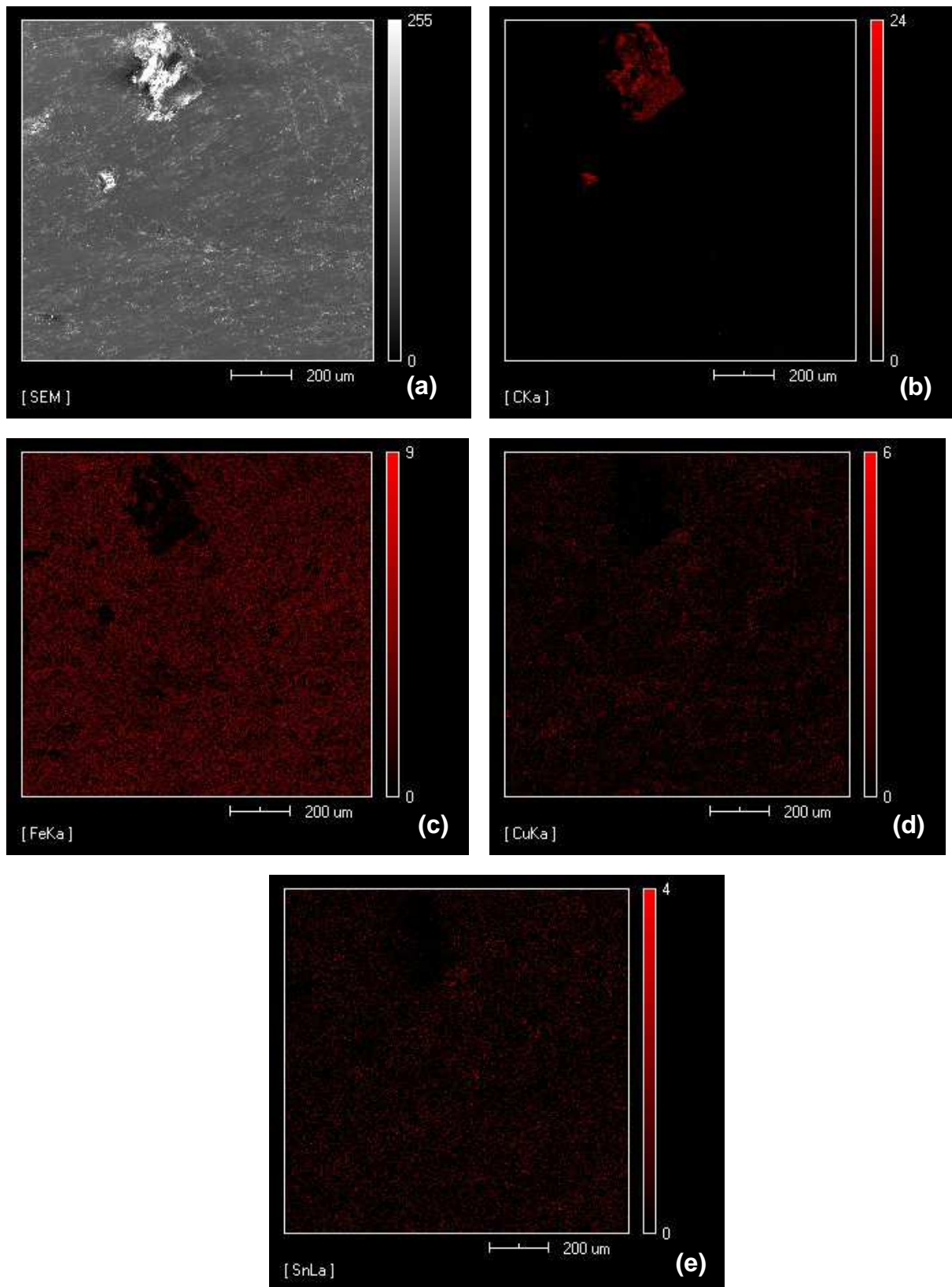


Figura 4.17 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21).  
Figura: (a) amostra do compósito diamantado; (b) diamante, (c), (d) e (e) elementos presentes.



#### 4.5.2- Compósito diamantado Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (Pérola Comercial China)

A micrografia do compósito diamantado Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (pérola comercial África do Sul), apresentado na Figura 4.18, mostra os pontos de identificação do ensaio de EDS pontual, sendo que os resultados da análise dos espectros de emissão característica de raios-X desta liga são mostrados nas Figuras 4.19 a 4.22.

Os resultados, obtidos da microanálise em ponto da Figura 4.18, confirmam a presença de um cristal de diamante no ponto 01 e, nas extremidades da imagem, os pontos 02 e 03 estão numa matriz rica em ferro. O ponto 04 contém uma matriz de ferro, com baixo teor de estanho, indicando a presença majoritária do elemento Fe na liga da pérola diamante comercial China. Sendo assim, os elementos Níquel e Cobre formaram uma solução sólida  $Fe_4Cu_3$  e  $FeNi_3$ , segundo o difratograma da Figura 4.8 deste trabalho.

Os resultados obtidos na análise química quantitativa da liga Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (pérola comercial África do Sul) são apresentados na Tabela 2 do Apêndice E.

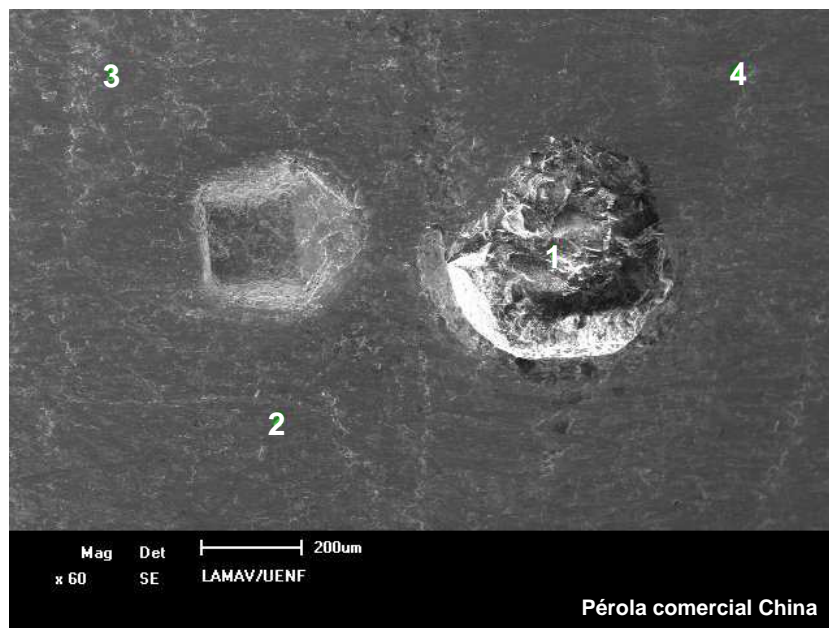


Figura 4.18 - Microestrutura da Liga Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), com identificação da região da microanálise por EDS.

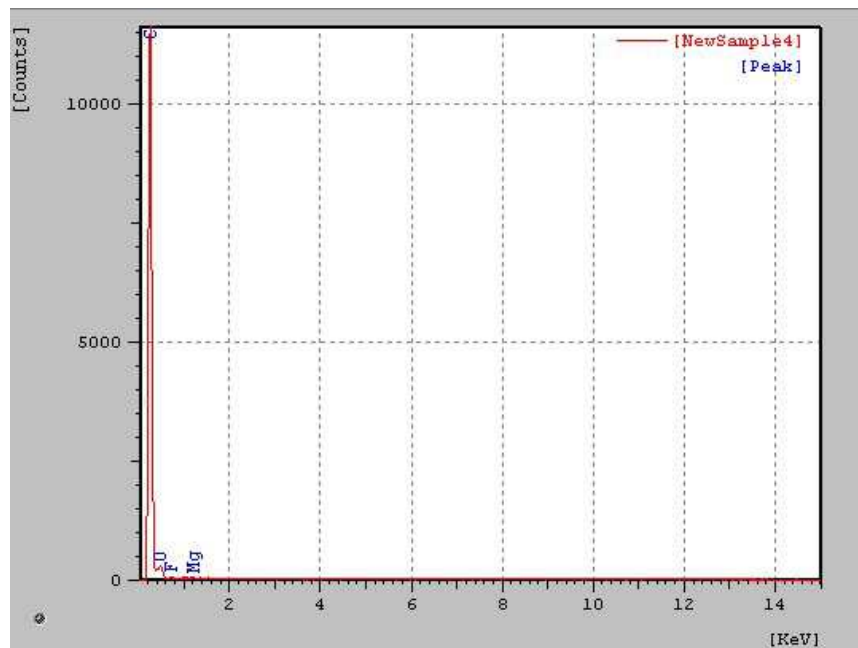


Figura 4.19 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 01 (Figura 4.18).

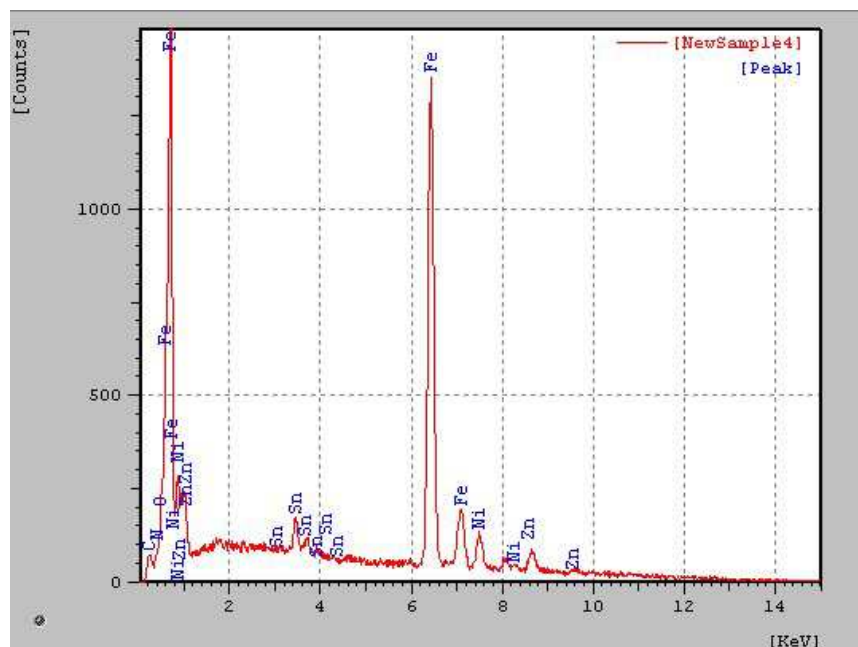


Figura 4.20 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 02 (Figura 4.18).



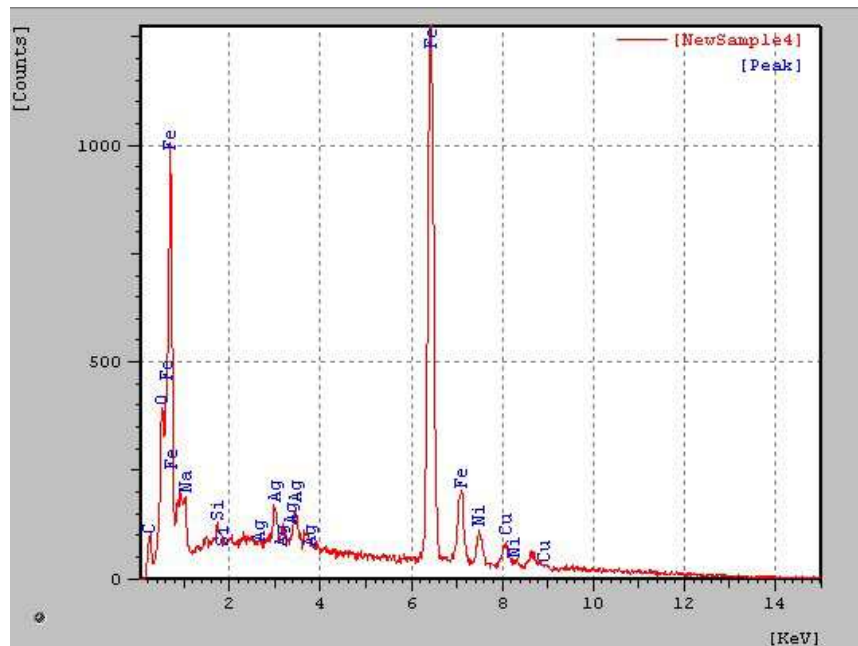


Figura 4.21 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 03 (Figura 4.18).

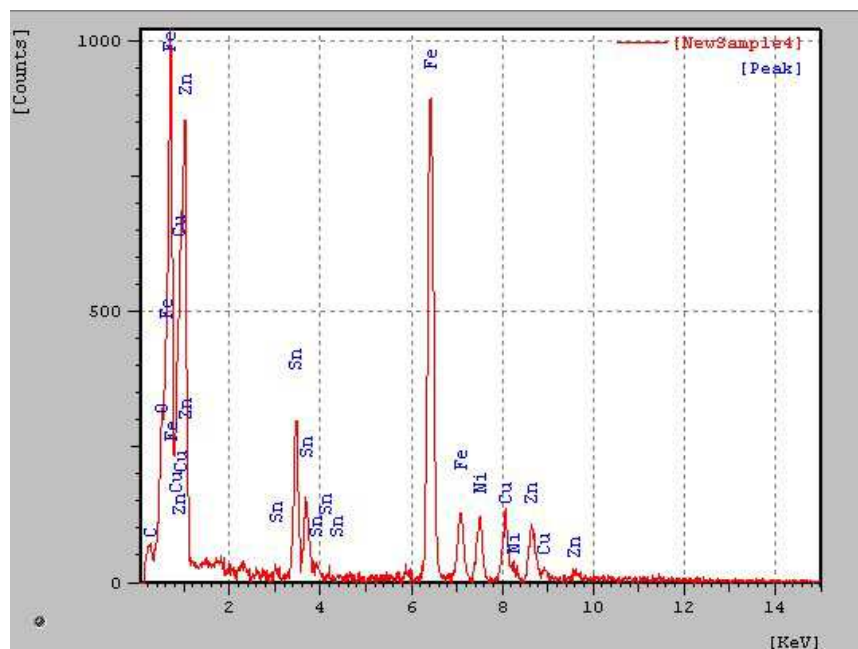


Figura 4.22 - Análise pontual por EDS da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), referente ao ponto 04 (Figura 4.18).

Análise de EDS da Liga Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn é apresentada na Figura 4.23, com os picos característicos dos elementos presentes. O mapeamento característico desta liga, realizado através da técnica de Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), verificou os elementos presentes na amostra, e constatou-se um maior teor de ferro em relação ao níquel e estanho, demonstrado na Figura 4.24.

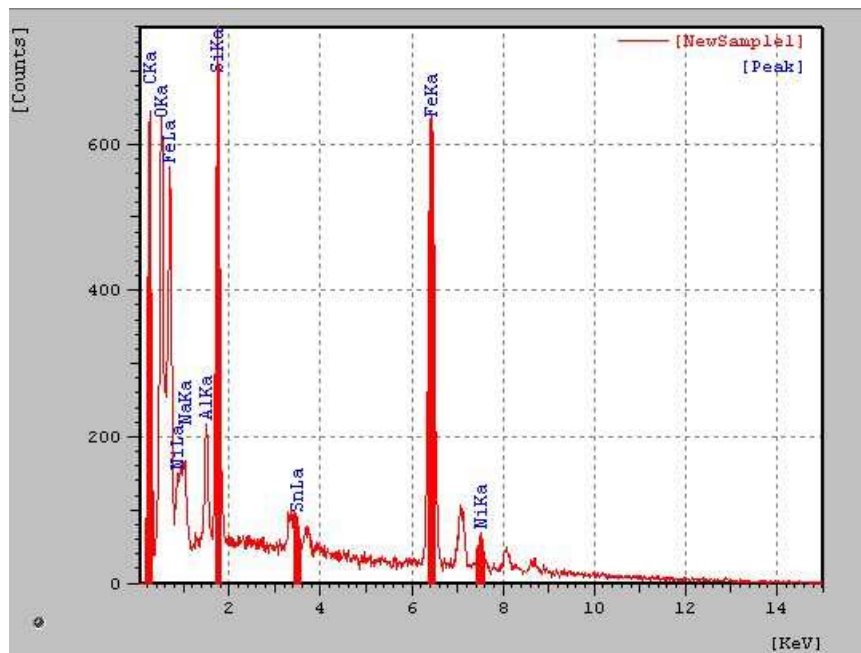


Figura 4.23 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China).

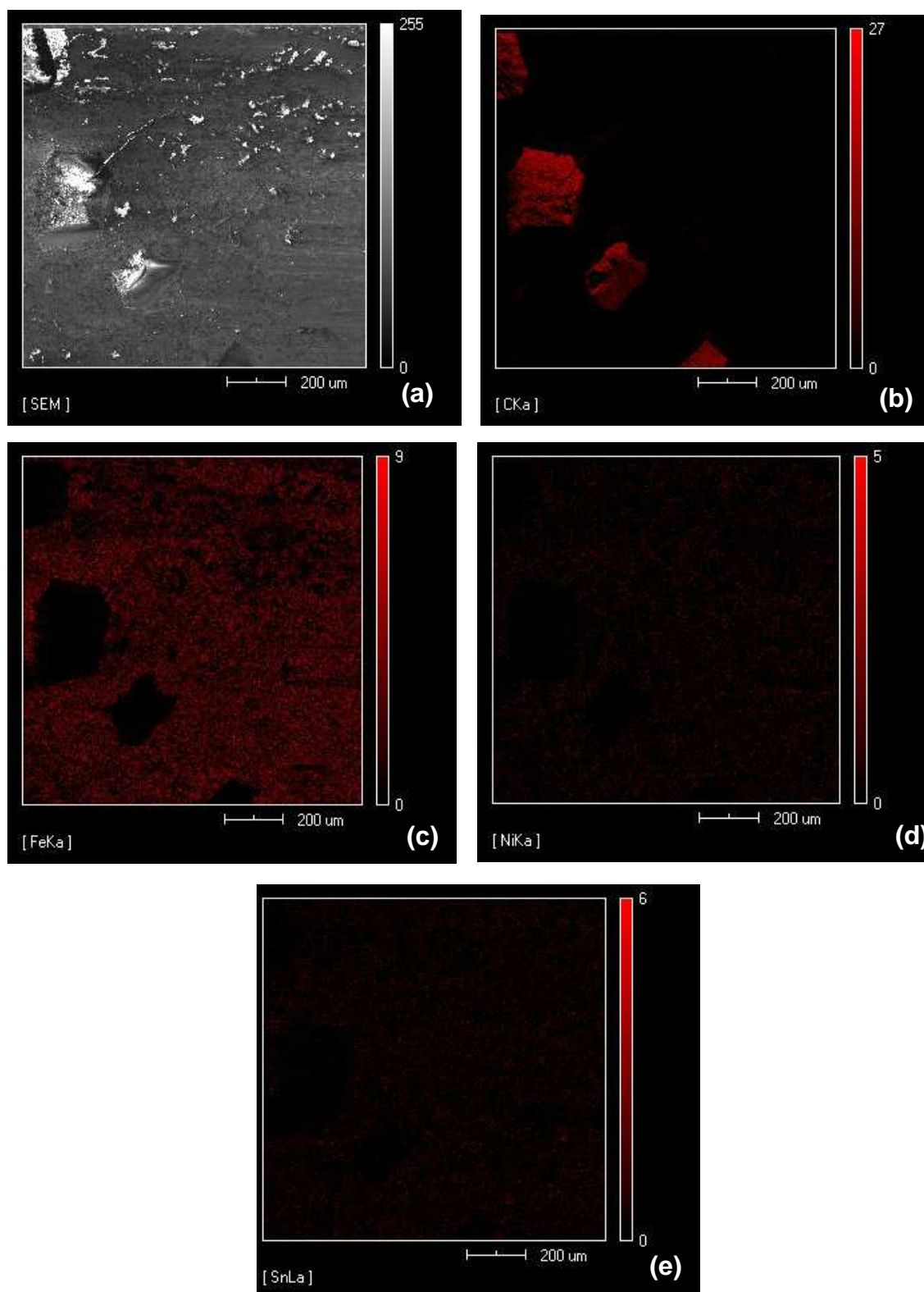


Figura 4.24 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China). Figura: (a) amostra do compósito diamantado; (b) diamante, (c), (d) e (e) elementos presentes.

#### 4.5.3- Compósito diamantado Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul)

Na micrografia do compósito diamantado da pérola comercial África do Sul, Cu-Fe-Zn-Sn-Ni, observa-se a identificação das regiões onde foi realizada análise por EDS pontual, sendo apresentada na Figura 4.25. A análise referente aos pontos 1, 2, 3 e 4 pode ser visualizada nas Figuras 4.26 a 4.29.

Os resultados obtidos da análise química quantitativa dos pontos da Figura 4.25, são mostrados na Tabela 3 do Apêndice E. Observa-se que o ponto 01 marcado no compósito metálico sobre um cristal de diamante, contém uma matriz de ferro e cobre, formando soluções sólidas  $Fe_4Cu_3$ , segundo o difratograma da Figura 4.9. No ponto 02, pode-se visualizar a matriz de ferro, com baixo teor de cobre, e o ponto 03 corresponde a um cristal de diamante (C). Já no ponto 04 contém uma matriz de ferro puro.

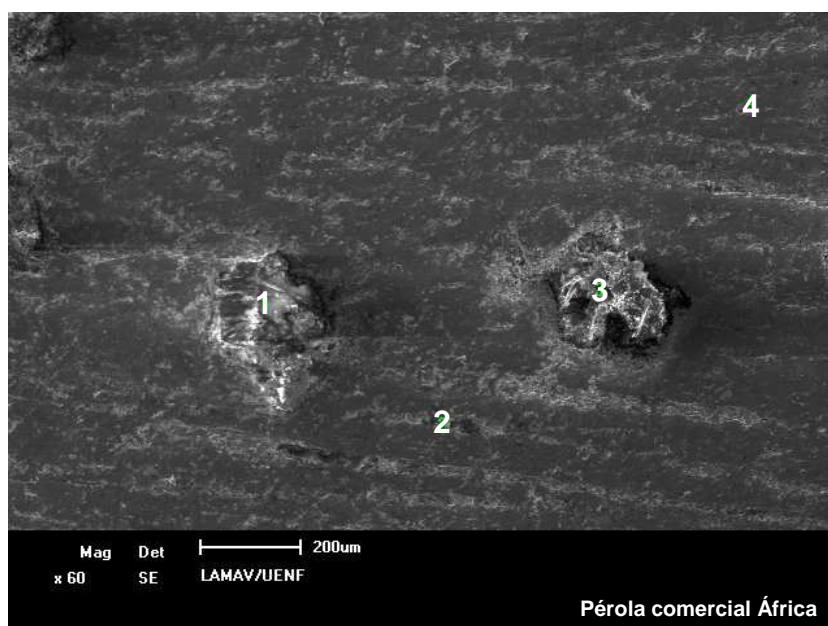


Figura 4.25 - Microestrutura da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul) com identificação da região da microanálise por EDS.

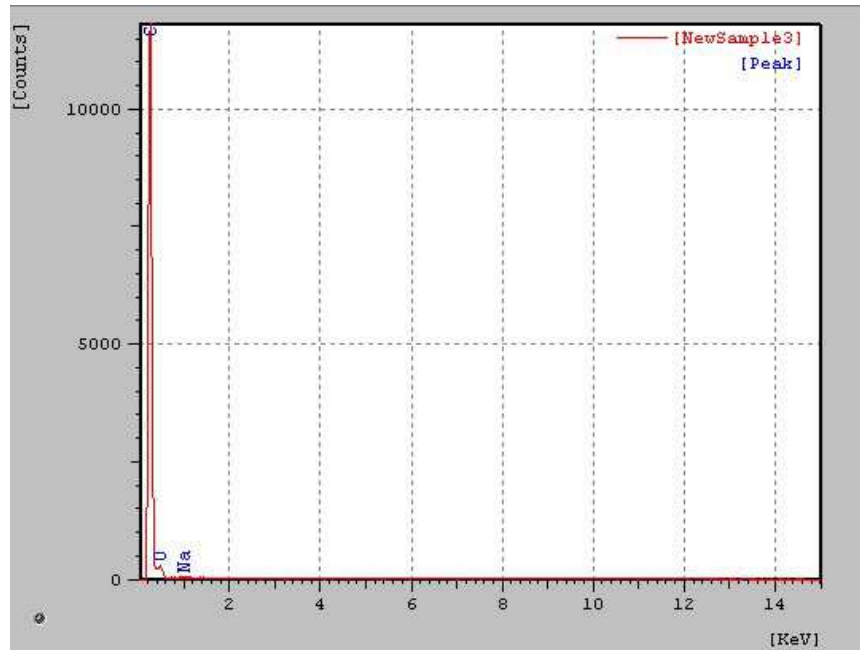


Figura 4.26 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 01 (Figura 4.25).

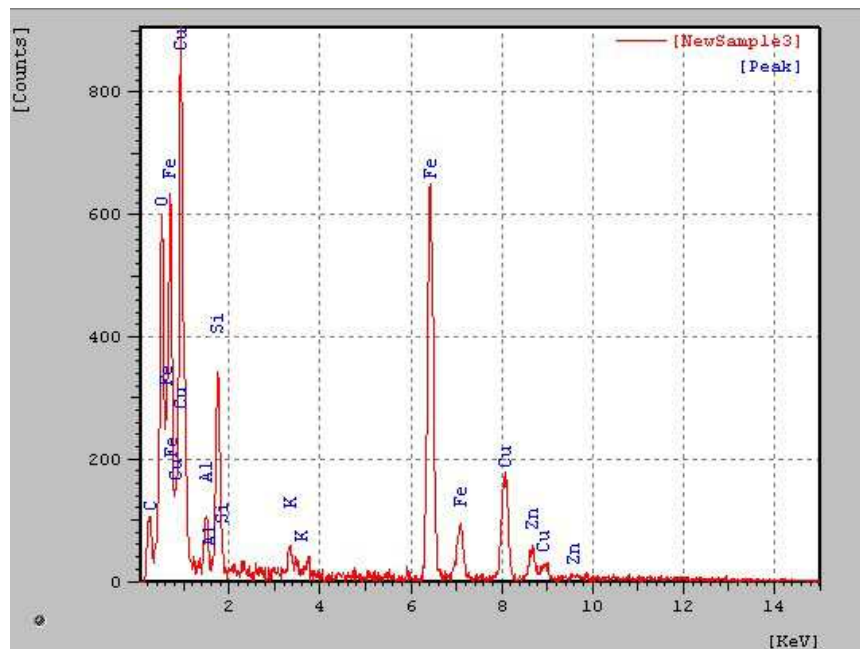


Figura 4.27 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 02 (Figura 4.25).

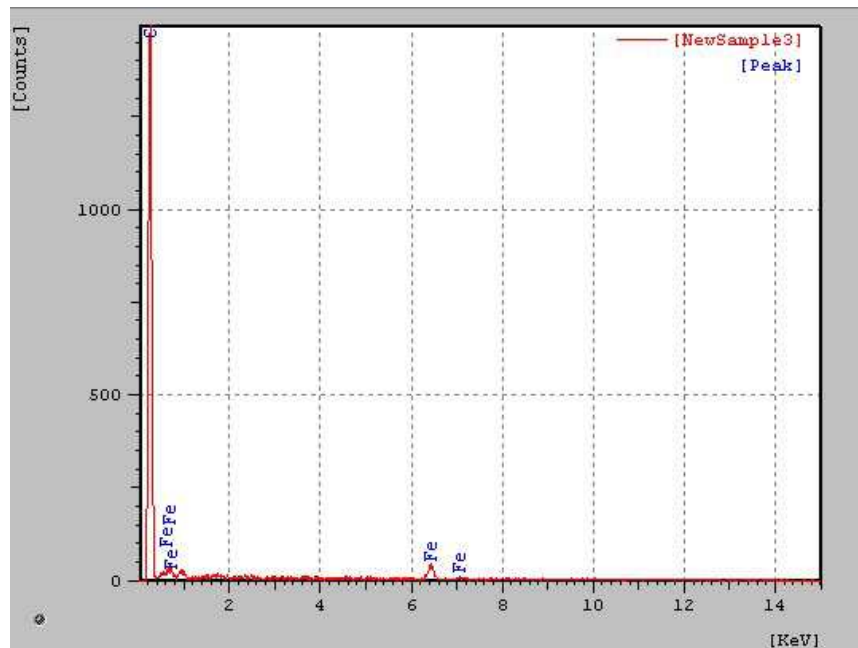


Figura 4.28 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 03 (Figura 4.25).

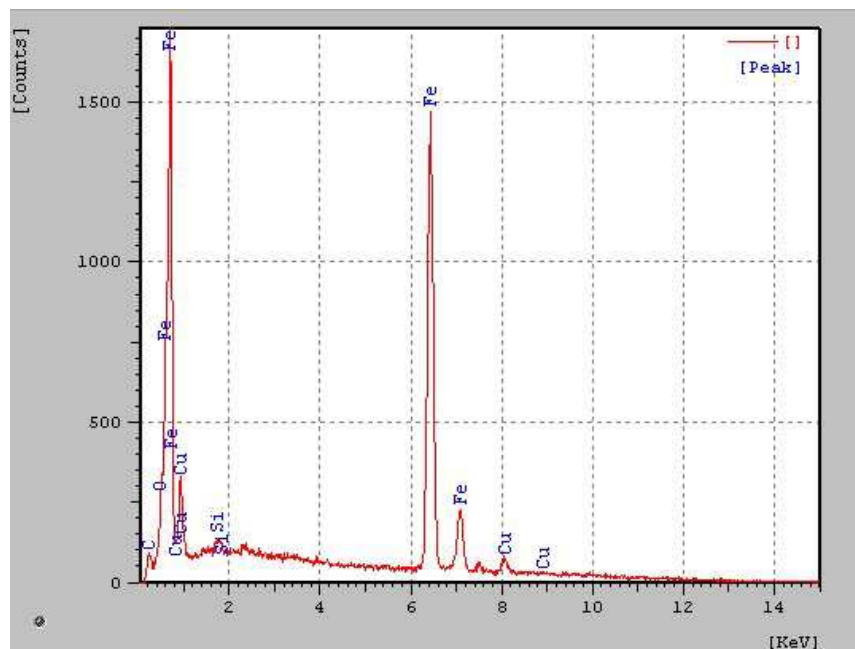


Figura 4.29 - Análise pontual por EDS da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul), referente ao ponto 04 (Figura 4.25).

Os resultados do uso da técnica de Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) na liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni, são apresentados na Figura 4.30, com picos característicos dos elementos presentes no compósito diamantado. Na Figura 4.31 é apresentado o mapeamento da superfície da liga metálica, através da qual foi constatada uma composição majoritária de ferro em relações aos demais elementos, sendo este resultado esperado, pois o cobre está dissolvido no ferro, formando solução sólida  $\text{Fe}_4\text{Cu}_3$ , conforme visto no difratograma da liga.

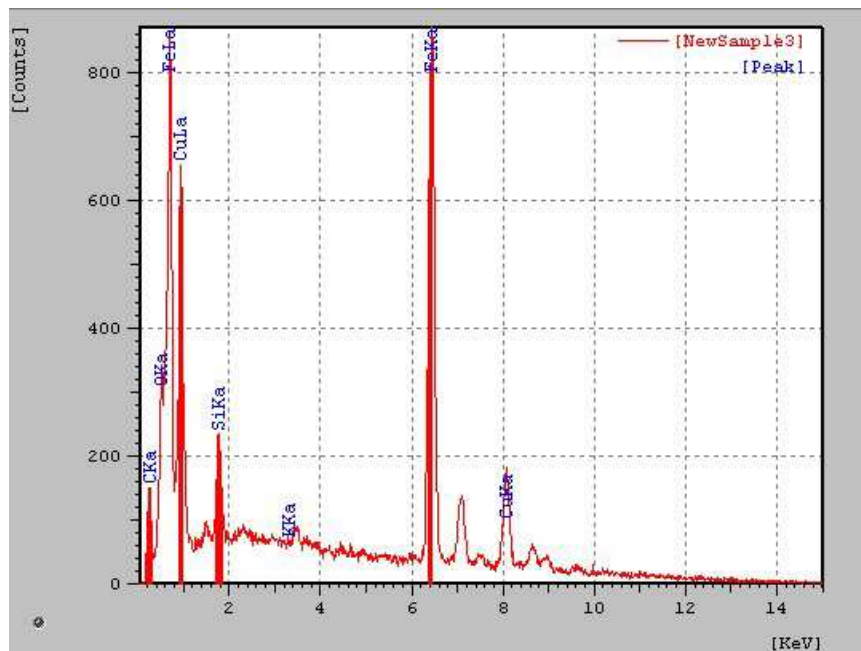


Figura 4.30 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul).



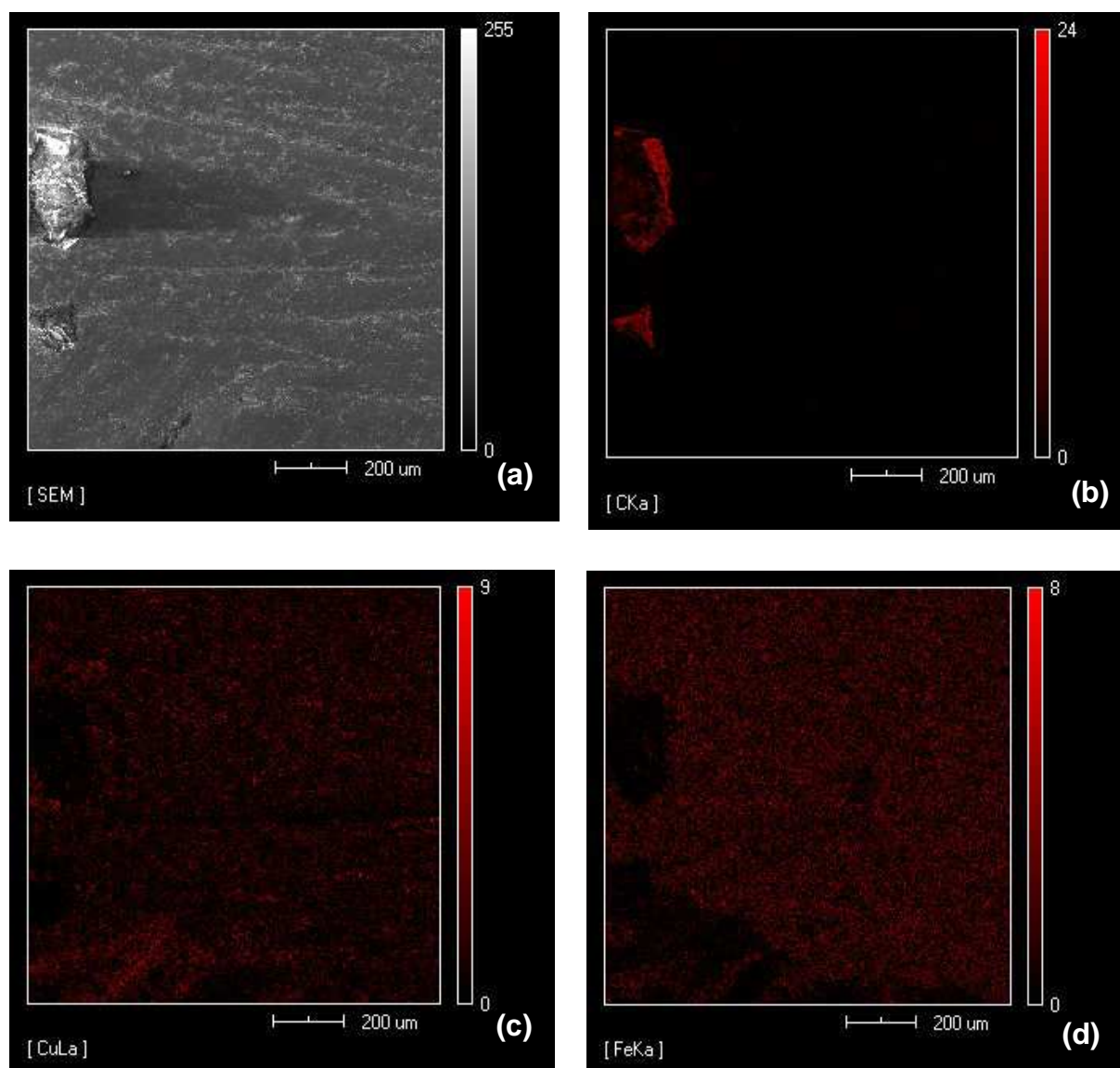


Figura 4.31 - Mapeamento por EDS da liga Metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul). Figura: (a) amostra do compósito diamantado; (b) diamante, (c), (d) e (e) elementos presentes.



#### 4.5.4- Compósito diamantado Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)

A imagem da microestrutura da liga Co-Fe-W-Cu-Ag (pérola comercial Itália), com a identificação das regiões onde foram realizadas análise por EDS pontual, é mostrada na Figura 4.32. Os resultados da análise pontual por EDS são apresentados nas Figuras 4.33 a 4.36, através dos espectros de emissão característicos de raios-X desta liga.

Pela microanálise em ponto da Figura 4.32, conclui-se que o ponto 01 e 2 são cristais de diamantes. O ponto 03 evidencia uma matriz rica em ferro, com solução sólida  $\text{Co}_3\text{Fe}_7$ , os resultados previamente mostrados e discutidos no difratograma da liga através da Figura 4.10. Já o ponto 04 observa-se uma matriz metálica rica em cobalto, sugere-se a formação da solução sólida  $\text{Co}_3\text{Fe}_7$ , conforme já mencionado.

Pode-se observar através da Tabela 4 do Apêndice E, o resultado da análise química quantitativa do compósito diamantado Co-Fe-W-Cu-Ag.

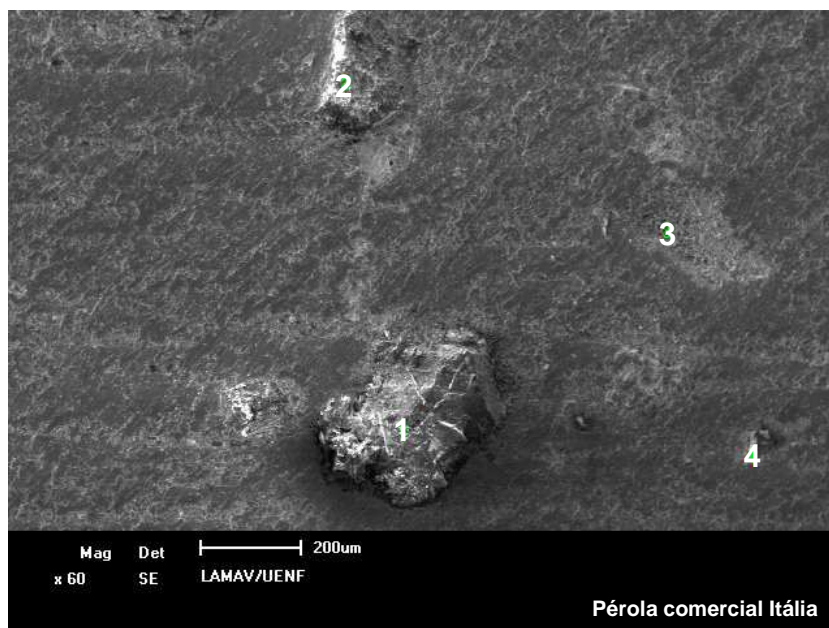


Figura 4.32 - Microestrutura da Liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), com identificação da região da microanálise por EDS.

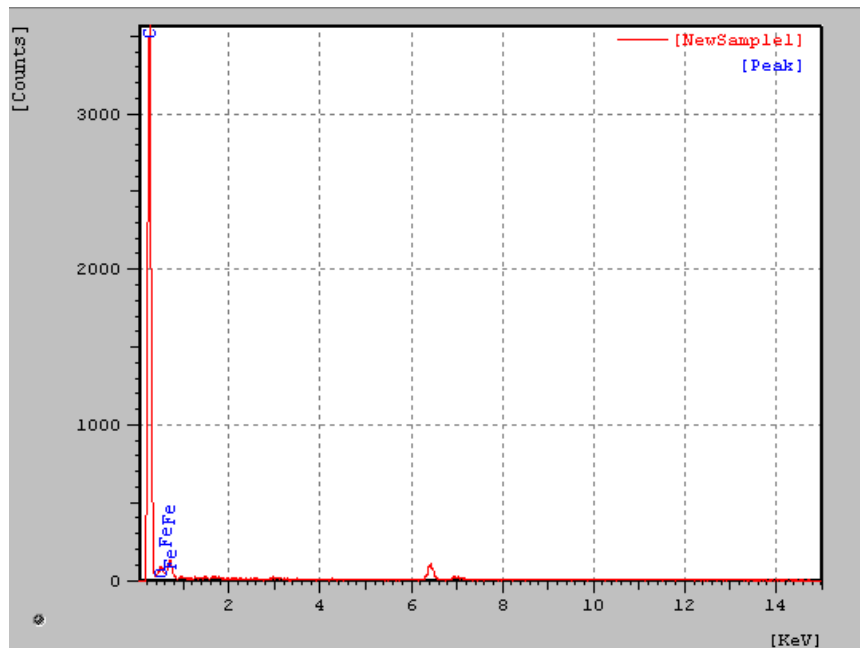


Figura 4.33 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 01 (Figura 4.32).

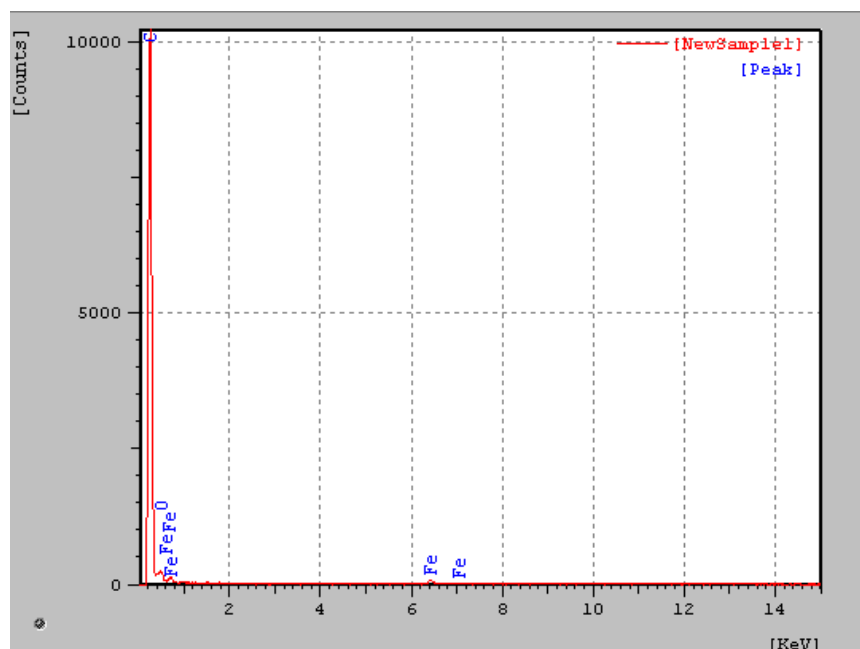


Figura 4.34 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 02 (Figura 4.32).

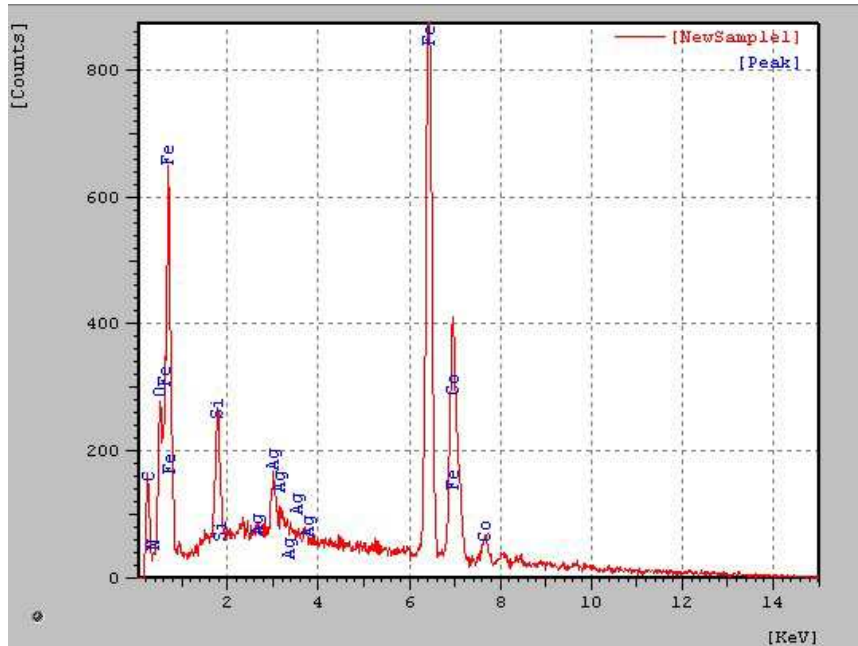


Figura 4.35 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 03 (Figura 4.32).

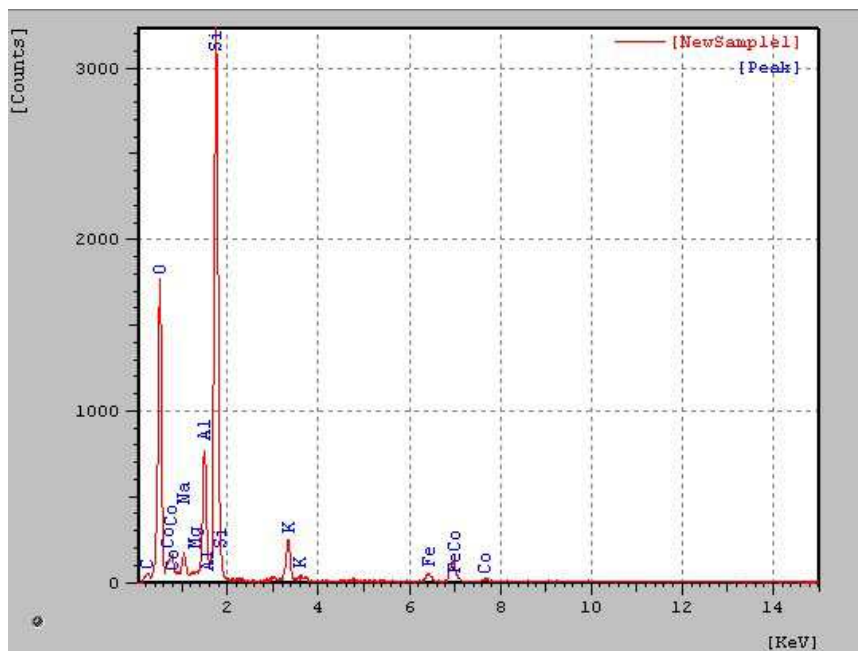


Figura 4.36 - Análise pontual por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália), referente ao ponto 04 (Figura 4.32).

O espectro da análise de EDS, da liga Co-Fe-W-Cu-Ag, com os picos característicos dos elementos presentes é mostrado na Figura 4.37. O mapeamento característico desta liga é demonstrado na Figura 4.38, com picos característicos dos elementos presentes.

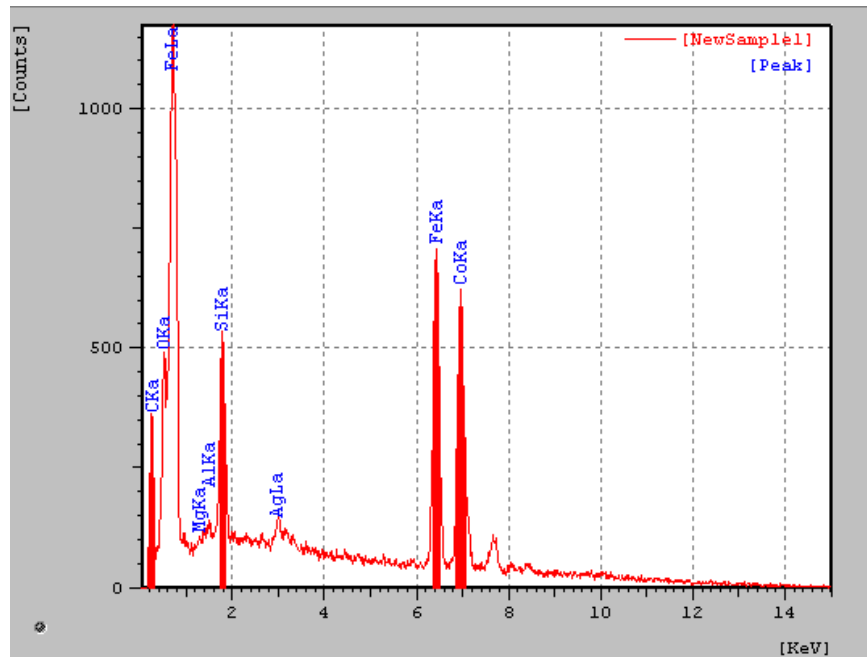


Figura 4.37 - Espectrometria por dispersão de energia de raios-X da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália).

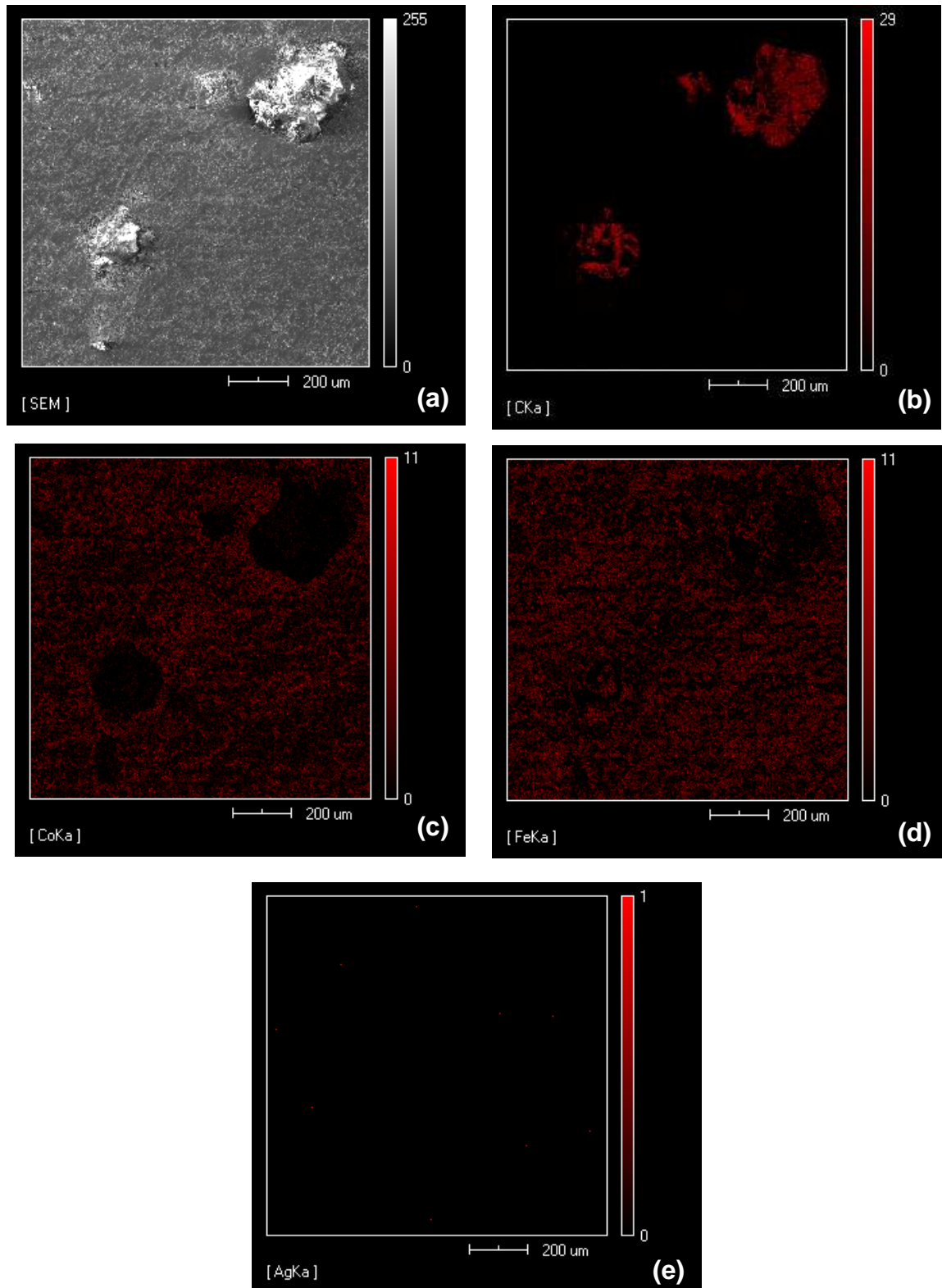


Figura 4.38 - Mapeamento por EDS da liga metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália). Figura: (a) amostra do compósito diamantado; (b) diamante, (c), (d) e (e) elementos presentes.

#### 4.6- Ensaio de Cisalhamento

O esforço de compressão é um dos principais carregamentos aos quais os elementos cortantes de uma pérola diamantada estão submetidos durante a operação de corte nas lavras de rochas ornamentais e gera o cisalhamento entre o tubo de aço e compósito diamantado. Esse carregamento é imposto pelo tensionamento do fio diamantado sobre as partículas abrasivas, que são os cristais de diamantes responsáveis pelo processo de corte. Em seguida o carregamento é transferido para a matriz ligante, a qual tem função de absorver essas cargas e dar suporte aos cristais abrasivos de diamante durante o corte. Além disso, o aspecto geológico do maciço rochoso, a presença de fraturas, tensões internas, assim como as características geométricas do corte contribuem para o aumento da carga compressiva.

Através do ensaio de cisalhamento, foi verificada a adesão do compósito diamantado no tubo de aço. Sendo assim, as pérolas diamantadas produzidas com a liga DIABASE-V21 (Fe-Cu-Co-Sn) ensaiadas, tiveram seus gráficos esboçados a partir de valores alcançados durante o ensaio de cisalhamento, obtendo curvas de força versus deslocamento (Figura 4.40). O sentido da carga aplicada sobre o compósito das pérolas é ilustrado na Figura 4.39.

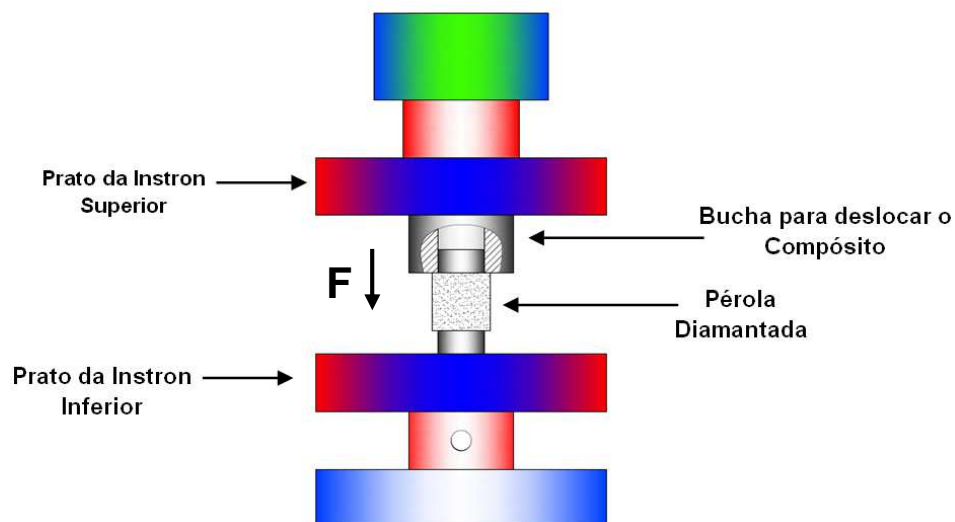


Figura 4.39 – Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento da pérola diamantada DIABASE-V21.

A resistência ao cisalhamento das pérolas sinterizadas em tubo com canais, foram as mais altas, mostrando uma carga de 2.087,620 kgf, para deslocar 1mm do compósito diamantado sobre o tubo de aço. Confrontando o resultado com a literatura do capítulo 2.2, percebe-se que as pérolas aqui produzidas (sinterizadas em tubos com canais), suportam uma força de aproximadamente 10 vezes superior a carga aplicada no tensionamento do fio diamantado durante a operação de corte de rochas ornamentais, que é 120 a 300 kgf. Este resultado é de enorme significado, pois a nacionalização da produção de pérolas de fio diamantado foi possível, tornando viável a sinterização dos compósitos diamantados em tubos com canais, eliminando o processo de brasagem (solda), que conseqüentemente pode diminuir os custos de fabricação. É importante informa, que o deslocamento linear da matriz ligante sobre o cilindro metálico não deve ultrapassar 1 (um) milímetro, pois pode comprometer a vida útil da pérola de fio diamantado.

As pérolas sinterizadas em tubo de aço sem canais apresentaram uma baixa resistência ao cisalhamento, mostrando uma carga 124,537 kgf, para deslocar 1 mm linear do compósito diamantado sobre o tubo metálico (Figura 4.40). Este resultado corresponde à menor carga aplicada no tensionamento de fios diamantados durante o processo de corte.

As pérolas de fios diamantados são montadas em cabo multifilamentar de aço, separadas por anéis de borracha e/ou molas. Esse conjunto, conseqüentemente, contribui para maior resistência ao cisalhamento desse tipo de ferramenta de corte nas lavras de rochas ornamentais.

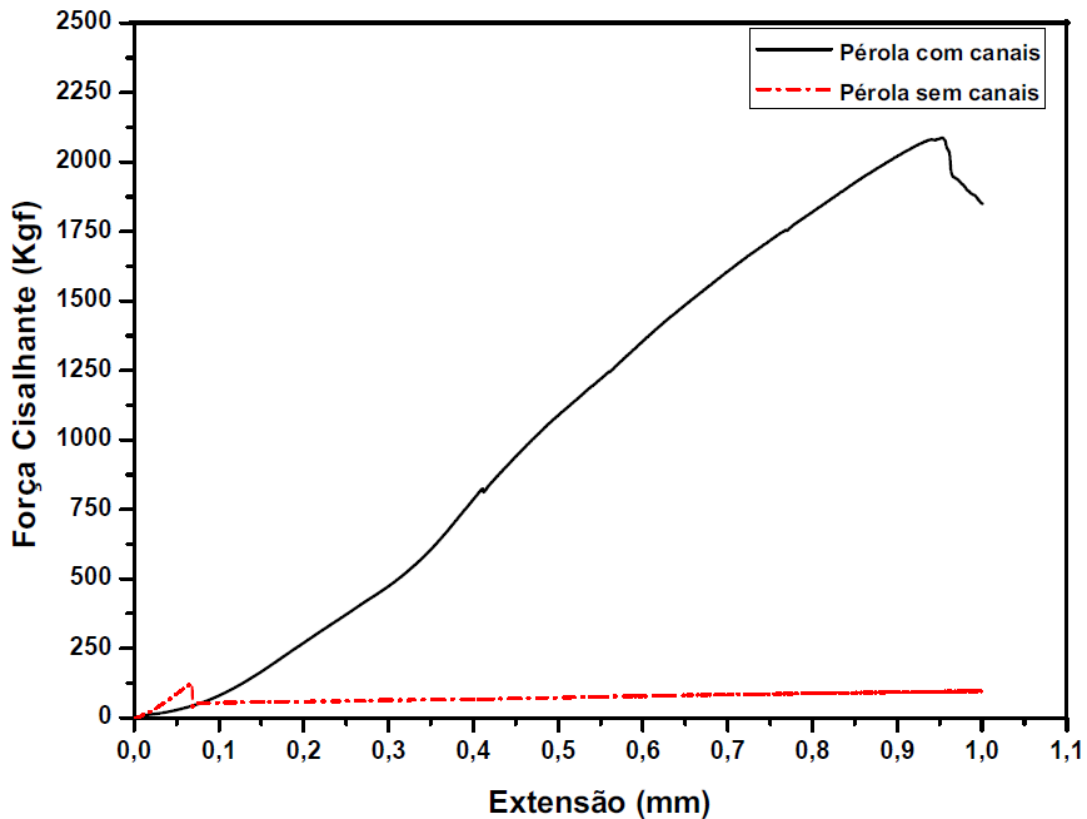


Figura 4.40 - Gráfico de força versus deslocamento dos compósitos diamantados das pérolas produzidas por este trabalho com a liga metálica DIABASE-V21.

As pérolas diamantadas usadas no ensaio de cisalhamento foram submetidas a análises microestrutural através de micrografias provenientes de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Pode-se observar nas Figuras 4.41 a 4.43, o comportamento do compósito diamantado das pérolas processadas com tubos metálicos com canais. De uma maneira geral há alguns danos na matriz metálica e cristais de diamante, o que não é um fato comum e sim uma consequência da carga aplicada durante o ensaio de cisalhamento.

Na Figura 4.41 constata-se o deslocamento de 1mm do compósito diamantado sobre o tubo metálico, expondo o canal. É possível também observar a abertura entre a matriz ligante e a superfície do tubo em aço, devido às condições agressivas do ensaio de cisalhamento. Essa agressividade pode ser vista claramente na Figura 4.42, onde observa-se o desprendimento da cobertura do cristal de diamante (vide seta). Os cristais de diamantes não sofreram alterações na sua forma geométrica cubo-octaedral.



Segundo Konstanty [1991], a melhor retenção de diamantes em uma matriz baseia-se no revestimento, formando uma ligação química e/ou mecânica com o diamante, e também formando um elo com o material da matriz que o rodeia. Se ambas as reações forem realizadas, acontecerá a melhor retenção do diamante na matriz metálica, via melhor adesão da matriz ligante ao diamante.

É importante informar que os diamantes utilizados neste trabalho são inteiramente revestidos com carbeto de Silício (SiC) e Níquel (Ni). Esses revestimentos não só adicionam textura rugosa à superfície plana e lisa do diamante, como também reagem quimicamente com os elementos dos quais a matriz é composta (Fe-Cu-Cu-Sn), formando compostos ou fases, tornando mais forte a adesão do diamante na matriz. Sem a presença deste revestimento e mediante aquecimento, a matriz ferrítica reagiria com o carbono da superfície do cristal de diamante, formando carbeto de ferro, que comprometeria fortemente a retenção do cristal pela matriz e promoveria a grafitização dos diamantes.

Na Figura 4.43 pode-se observar que ocorreram fraturas no compósito diamantado (vide setas), após as condições agressivas do ensaio de cisalhamento. Não é comum este fenômeno durante operação de corte nas lavras de rochas ornamentais, pois a elevada carga (2.087,620 kgf) aplicada sobre a amostra, bem como o deslocamento da matriz ligante sobre a superfície do tudo metálico durante o ensaio, promovendo trincas na matriz ligante. Em face desses resultados é oportuno ressaltar a alta qualidade dos diamantes utilizados neste trabalho, no qual possuem elevada tenacidade e resistência ao impacto.

Oliveira, H.C.P [2010] comenta que, durante o resfriamento após sinterização, as diferenças entre as condições térmicas dos cristais de diamantes e a matriz metálica podem causar o surgimento de tensões na interface. Se a contração da matriz for maior que as dos cristais, estes ficarão sob compressão mecânica aumentando a interação entre as faces presentes na matriz metálica, o que é benéfico para a adesão dos diamantes.

Entretanto, podem aparecer trincas se o nível de carregamento em que a matriz metálica é submetida durante o ensaio, ultrapassar a sua resistência mecânica, como se verifica na Figura 4.43 (vide setas).

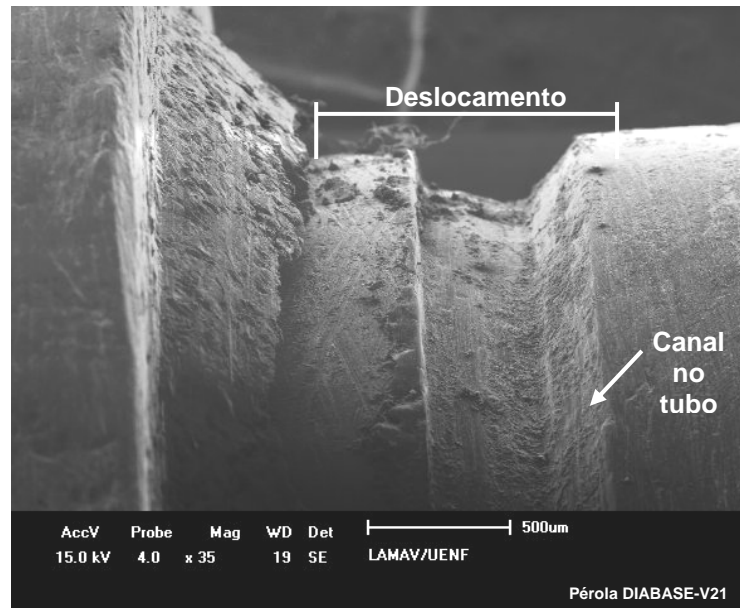


Figura 4.41 - Micrografia realizada após ensaio de cisalhamento da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante, sinterizada em tubo metálico com canais.

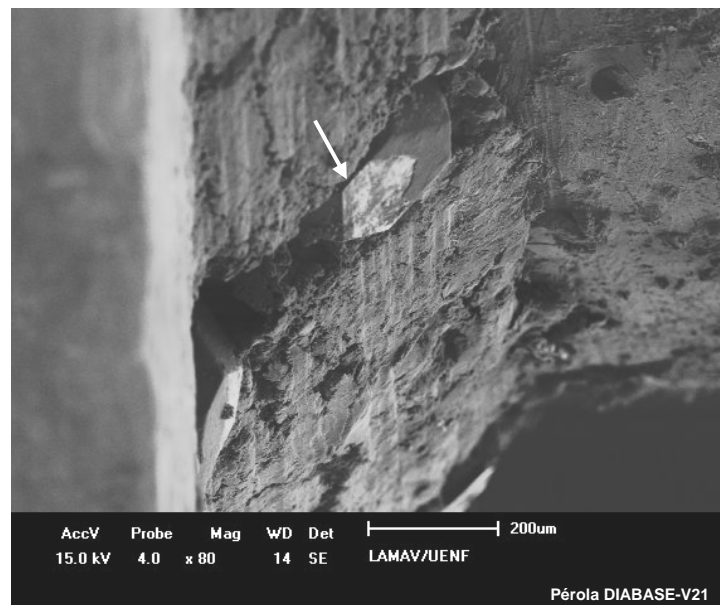


Figura 4.42 - Micrografia mostrando os cristais de diamante após ensaio de cisalhamento da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante, sinterizada em tubo metálico com canais.

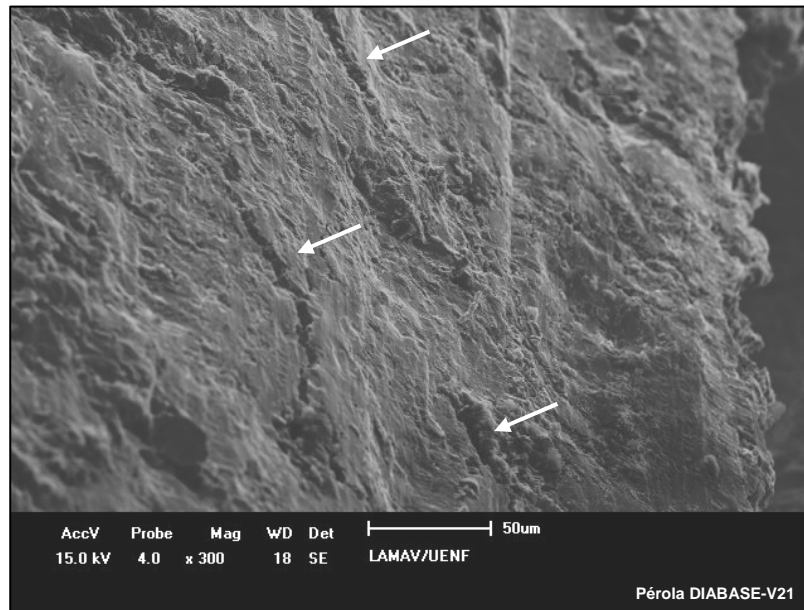


Figura 4.43 - Micrografia mostrando o compósito da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante após ensaio de cisalhamento, sinterizada em tubo metálico com canais.

Na Figura 4.44 pode ser notada a presença de resíduos do ligante (Fe-Cu-Co-Sn) aderidos sobre a superfície do tubo de aço sem canais (vide linha de cota), o que indica uma adesão da matriz ligante pelo cilindro metálico. Essa adesão deve-se ao processo sinterização. Conseqüentemente, a temperatura de 800°C e a pressão aplicada para o confinamento do compósito diamantado contribuíram para uma boa resistência ao cisalhamento.

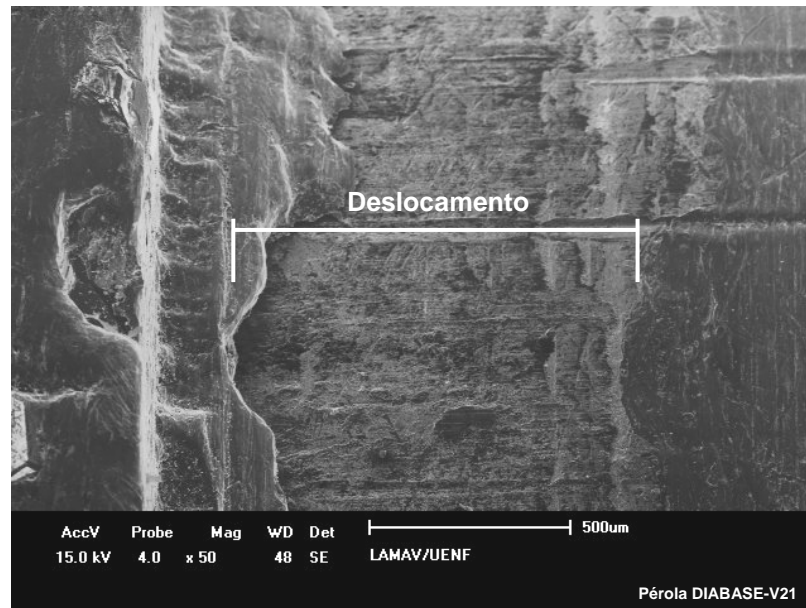


Figura 4.44 - Micrografia realizada após ensaio de cisalhamento mostrando adesão do Compósito diamantado da pérola Fe-Cu-Co-Sn-Diamante no tubo metálico sem canais.

#### 4.7- Ensaio de Resistência à Abrasão

A pérola de matriz metálica DIABASE-V21 com adição de 4% de diamantes, e pérolas comerciais África do Sul, Itália e China, foram ensaiadas a fim de medir a taxa de desgaste, para os tempos de 2, 6 e 12 minutos. Neste ensaio, as amostras foram fixadas de tal forma que a parte cilíndrica da amostra ficava em contato com a superfície do disco de granito fixado no abrasímetro.

O ensaio de desgaste por abrasão é de suma importância, pois ele é um indicativo da resposta da aplicação das pérolas de fio diamantado. Para análise dos resultados obtidos nos ensaios, os dados foram dispostos em um gráfico que mostra a evolução da resistência à abrasão em relação ao tipo de pérola diamantada, considerando-se a dependência da resistência à abrasão em relação ao tempo.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos do ensaio de resistência à abrasão (RA) para cada pérola diamantada estudada por este trabalho, mostrando o comportamento de cada uma em intervalos de tempos diferentes após perda de massa durante o ensaio.

Tabela 4.2 – Resistência à Abrasão das pérolas diamantadas.

<b>Tempo (min)</b>	<b>Resistência à Abrasão (%)</b>			
	<b>Pérola África do Sul</b>	<b>Pérola Itália</b>	<b>Pérola China</b>	<b>Pérola DIABASE-V21</b>
<b>2</b>	2,448 ± 0,158	1,484 ± 0,081	1,649 ± 0,059	1,210 ± 0,114
<b>6</b>	1,440 ± 0,083	0,890 ± 0,173	0,389 ± 0,086	0,337 ± 0,040
<b>12</b>	0,709 ± 0,063	0,451 ± 0,150	0,256 ± 0,052	0,235 ± 0,025

Na Figura 4.45, apresentam-se os resultados de RA, dispostos em gráfico, para melhor entendimento. Analisando-se o ensaio para o tempo de 2 minutos, nota-se que a pérola comercial África do Sul obteve valores mais altos de resistência à abrasão, comparando-se com as demais pérolas estudadas.

Entretanto, a pérola diamantada produzida a partir da liga industrial DIABASE-V21, o qual é um pó pré-ligado do mercado internacional utilizado como matriz ligante para ferramentas diamantadas, o tempo de 2 minutos de ensaio de resistência à abrasão para esta amostra, ocorrem basicamente o desgaste da matriz ligante para o surgimento dos primeiros diamantes, aos quais correspondem às primeiras faces cortantes para dar início a operação de corte da rocha.

Para o ensaio de 6 minutos, percebeu-se uma queda da resistência à abrasão das pérolas diamantadas, o que indica uma maior perda de massa das ferramentas durante o corte. Isso ocorreu porque os diamantes expostos à superfície da matriz deram continuidade à operação de corte, resultando assim em perda da matriz ligante e diamantes, em relação ao ensaio de 2 minutos.

É interessante observar, que, antes deste tempo de 6 minutos, houve um decréscimo dos valores de resistência à abrasão, enquanto que, acima deste tempo, há uma certa linearidade dos valores de RA para as pérolas diamantadas China e DIABASE-V21. É neste intervalo de tempo que essas pérolas começam a desenvolver um trabalho de corte eficiente, obtendo-se uma taxa de desgaste moderado e constante, pois os diamantes estão

completamente expostos e com altura de protrusão suficiente e necessária para um bom desempenho.

Quando o ensaio finaliza em 12 minutos, a resistência ao desgaste, em relação à 6 minutos, não foi diferente para a pérola comercial África do Sul e Itália, pois observa-se a queda do valor de resistência à abrasão de aproximadamente 50% para ambos os tempos de ensaio. Apesar destes valores baixos, os diamantes possuem capacidade de corte, embora tenha começado a planificar durante o corte, desgastando severamente seus vértices e, ao mesmo tempo, a liga metálica sofre perda de massa pelo atrito com a rocha. Desta forma, pouca ou quase nenhuma adesão entre a matriz e o diamante é alcançada, o que conseqüentemente leva ao destacamento (pull-out) dos cristais de diamantes, conforme será abordado no capítulo 4.8.

Entretanto, este tempo de 12 minutos de ensaio foi o que apresentou a menor queda do valor de resistência à abrasão, para liga DIABASE-V21 e pérola comercial China, tendo desempenho similar durante operação de corte, para todos os tempos de ensaio de abrasão.

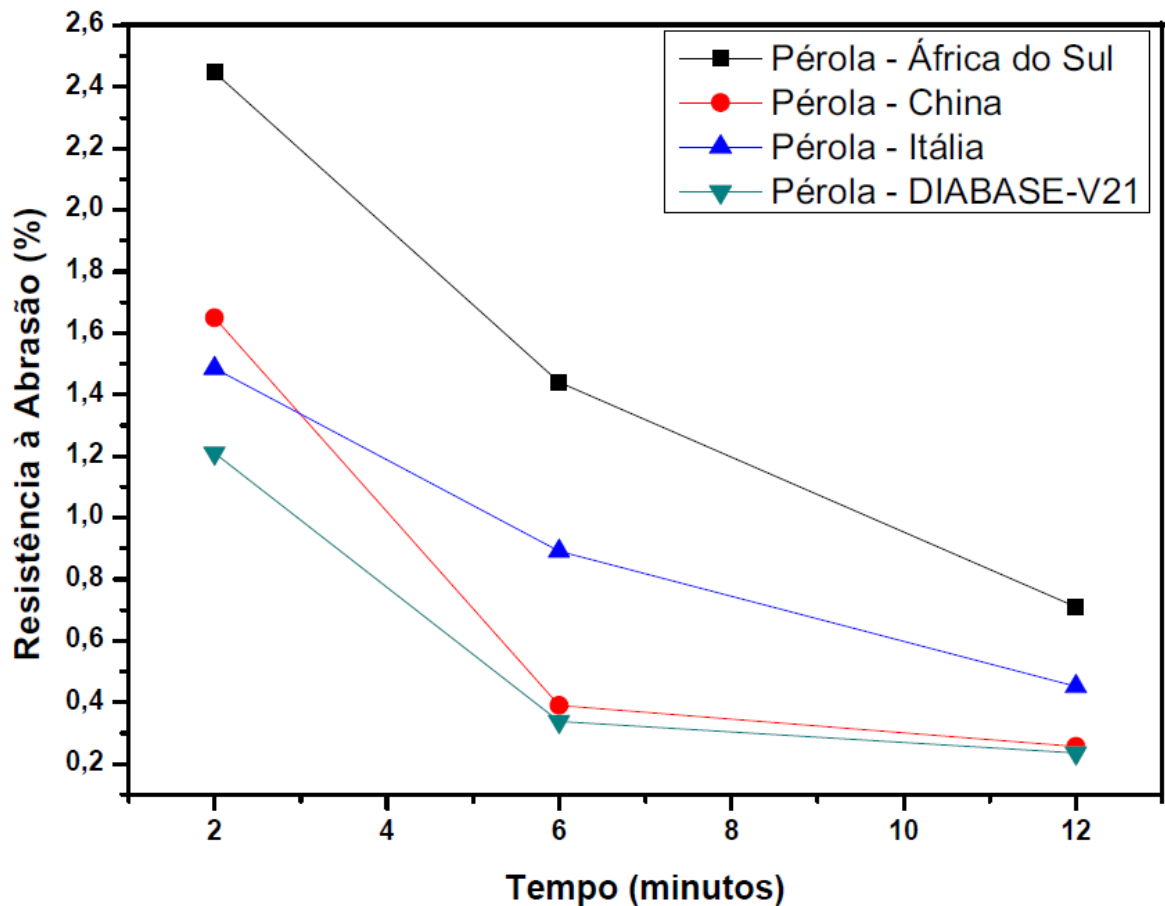


Figura 4.45 - Gráfico de Resistência à Abrasão *versus* Tempo das pérolas diamantadas.

O desgaste da ferramenta diamantada é um processo contínuo, ou seja a matriz deve ser capaz de reter os diamantes quando estes ainda apresentam capacidade de corte, para que não haja protrusão dos diamantes antes do término de sua vida útil de corte.

Analisando os resultados em função das diferentes tipos de pérolas diamantadas estudadas, percebe-se uma tendência nos valores de resistência à abrasão da pérola Comercial África do Sul (Cu-Fe-Zn-Sn-Ni) apresentando melhor valor de RA nos três tempos estudados. Segundo Barbosa [2008] e Oliveira [2009], ligas metálicas com maior teor de cobre, proporcionam melhores resultados de resistência à abrasão. Justifica-se pelo fato que durante a sinterização, ocorre extensiva formação de solução sólida FeCu, verificado no difratograma da pérola comercial África do Sul, evidenciado na Figura 4.9.

Portanto, o endurecimento por formação de solução sólida de cobre em ferro promove o aumento de algumas propriedades mecânicas de interesse. Dentre elas pode-se destacar a resistência à tração e a dureza, as quais podem ser acrescidas em magnitude da ordem de 50 a 60 %, em comparação ao cobre e ferro puros [Tandon and Johnson, 1998; Oliveira, 2005]. Particularmente, as duas propriedades acima citadas estão diretamente ligadas à adesão com os diamantes [Filgueira and Pinatti, 2003], sendo um fator positivo e indicativo de sucesso do uso do sistema Fe-Cu como matriz ligante para os diamantes, como foi mostrado nos trabalhos de Oliveira e Filgueira [2007], Oliveira et al.[2007] e Barbosa [2008].

A dureza de um material ligante para pérola de fio diamantado, está ligada diretamente com um desgaste uniforme da liga metálica e o diamante, sendo assim o desgaste do ligante é necessário. A medida que os cristais de diamantes perdem seu corte são substituídos por outros em camadas inferiores no ligante. A matriz ligante não pode ter uma dureza tão elevada, pois substituição das faces cortantes é de fundamental importância na vida útil da pérola diamantada.

Nota-se que a pérola comercial Itália (Co-Fe-W-Cu-Ag) teve uma resistência à abrasão inferior, se comparada com os valores da pérola comercial África do Sul. Possivelmente, a concentração de 11%pWC na composição, e a formação de solução sólida CoFe, podem ter elevado a dureza da matriz ligante, pois nem sempre o ligante mais duro é o que apresenta maior resistência ao desgaste. Se o ligante tiver uma dureza muito alta, os diamantes não conseguirão se manter fixados na matriz metálica durante o corte, o que prejudicaria no processo de corte de rochas ornamentais, conforme será abordado posteriormente.

De acordo com a literatura, o carbeto de tungstênio é um elemento controlador da taxa de desgaste nas ferramentas diamantadas. Quando utilizado, seu percentual se situa na faixa de 0,5 a 2%peso [Mészáros e Vadasdi, 1994]. Além disso, o WC proporciona elevada dureza da matriz metálica.

Em vista dos resultados apresentados acima, a pérola produzida por este trabalho (DIABASE-V21), apresentou resultados satisfatórios de resistência à abrasão compatível aos de alguns tipos de pérolas comerciais importadas, normalmente empregadas nas lavras de rochas ornamentais. Entretanto, os diamantes presentes na pérola DIABASE-V21 mostraram comportamento similar de desgaste para os diamantes da ferramenta comercial China. Isto é um indicativo da viabilidade técnica para fabricação de ferramentas diamantadas utilizando-se a



metodologia inovadora deste trabalho, relevante avanço tecnológico para a indústria nacional.

#### **4.8- Análise Microestrutural do Compósito Diamantado e Pérolas Comerciais Após Ensaio de Resistência à Abrasão**

A análise microestrutural da pérola diamantada DIABASE-V21 e pérolas diamantadas comerciais foram realizadas após o final de cada tempo de ensaio de resistência à abrasão (2, 6 e 12 minutos), a fim de verificar o comportamento dos diamantes na matriz metálica durante o trabalho de corte.

O comportamento dos diamantes da pérola diamantada produzida com a liga comercial DIABASE-V21 (Fe-Cu-Co-Sn) foi o mesmo em comparação às pérolas comerciais estudadas neste trabalho. Com o início do ensaio, houve o surgimento dos cristais de diamante, sofrendo desgaste durante o corte, aparecendo faces irregulares, pontiagudas e planificadas e até seu destacamento (pull-out) da matriz ligante ao final do ensaio. Isto é um comportamento típico de uma ferramenta de corte, conforme abordado neste item 4.8.

##### **4.8.1- Compósito diamantado Fe-Cu-Co-Sn (Pérola DIABASE-V21)**

As Figuras 4.46 a 4.48 apresentam a distribuição dos 4% em peso dos cristais de diamantes na matriz metálica de Fe-Cu-Co-Sn (DIABASE-V21), bem como alguns fenômenos de desgaste, observados após ensaio de resistência à abrasão, ao final dos tempos de 2, 6 e 12 minutos, respectivamente.

Pode-se observar a distribuição uniforme dos cristais de diamantes na matriz metálica ligante, que contribui para a retenção dos diamantes e trabalho de corte da pérola diamantada, bem como diamantes com diferentes alturas de protrusão (altura exposta do diamante), sendo mais marcante esta característica à medida que aumenta o tempo do ensaio de resistência ao desgaste do compósito diamantado, finalizando com o destacamento do cristal de diamante. Este é o mecanismo clássico de desgaste de compósitos metal-diamante.

Em detalhe a Figura 4.46 observa-se que as faces cortantes dos diamantes começam a aparecer na matriz, pouco desgastado, indicando o início do processo de corte. A partir da Figura 4.47, surgem cristais de diamantes clivados, atribuído à elevada força de impacto durante o ensaio de resistência à abrasão e uma pequena formação de gap em alguns cristais. Além disso, ocorre o desgaste da matriz ligante surgindo novas faces cortantes dos grãos abrasivos (vide seta). Já na Figura 4.48, os cristais de diamantes estão mais expostos na matriz metálica e mais degradados, e um fechamento de “pull-out” é observado na parte superior central da micrografia.

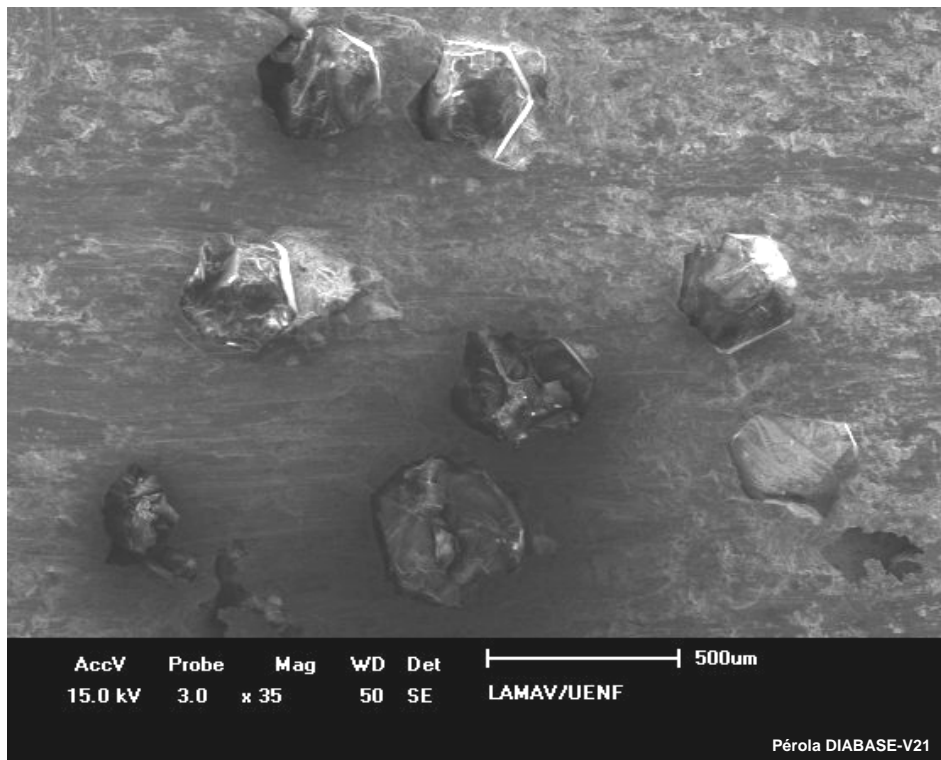


Figura 4.46 - Distribuição dos cristais de diamantes do compósito DIABASE-V21, após 2 minutos de ensaio de abrasão.

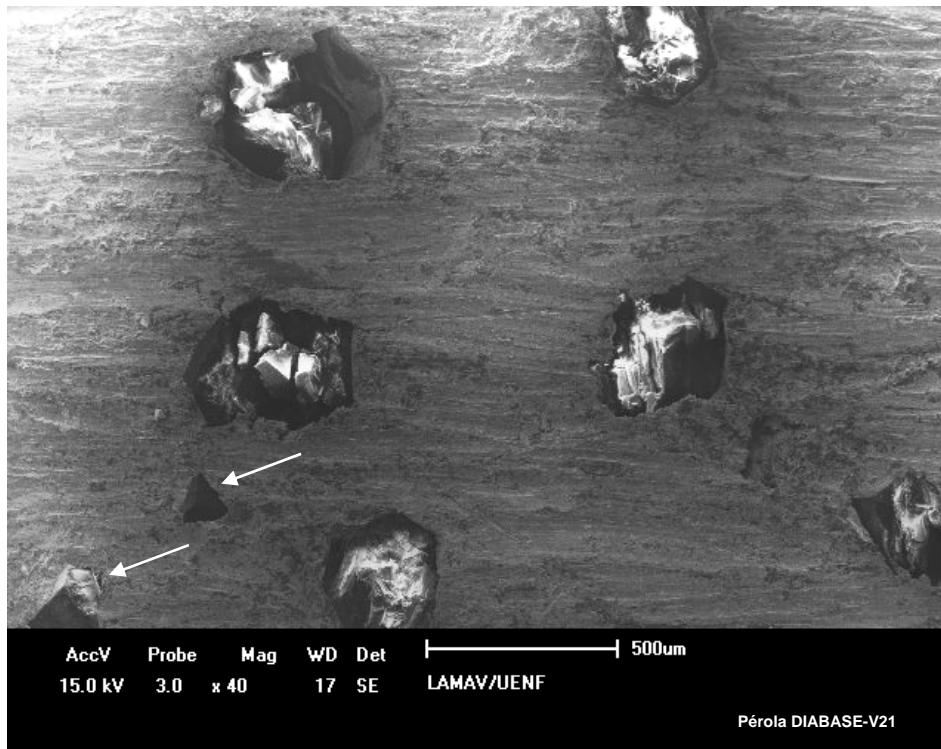


Figura 4.47 - Distribuição dos cristais de diamantes do compósito DIABASE-V21, após 6 minutos de ensaio de abrasão.

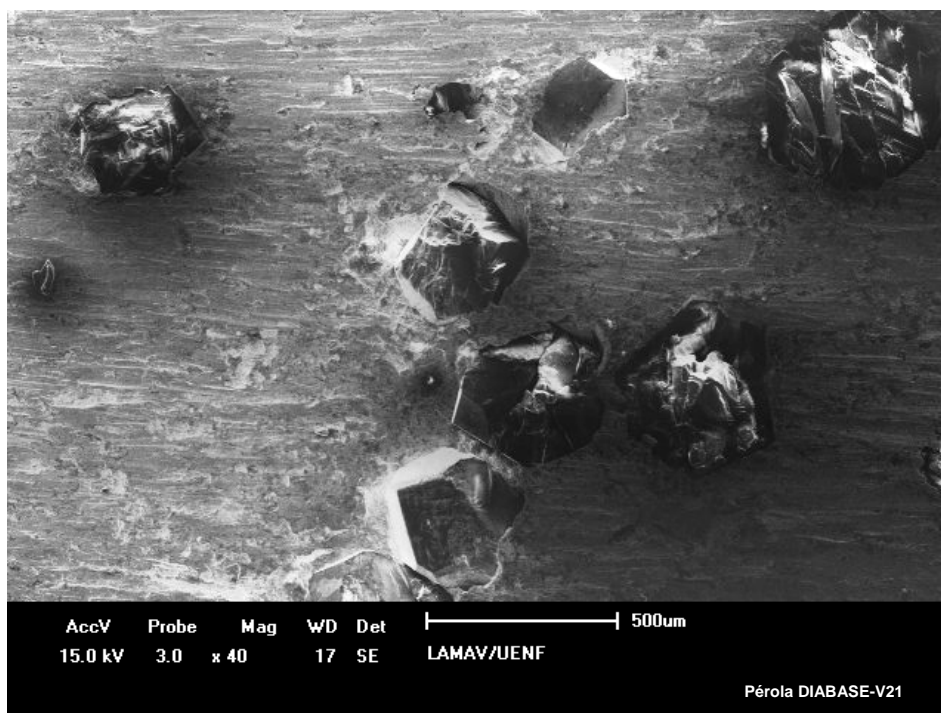


Figura 4.48 - Distribuição dos cristais de diamante do compósito DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.

Na Figura 4.49, o cristal de diamante se encontra intacto com boa ligação química/mecânica com a matriz, resultando na boa adesão, pronto para iniciar o processo de corte. Por outro lado, na Figura 4.50 pode-se notar o desgaste por fratura frágil ou a “quebra” de um cristal de diamante encravado na matriz metálica. Esse comportamento não é comum durante o processo de corte nas lavas de rochas ornamentais, pois o ensaio de resistência à abrasão das pérolas diamantadas foi feito em abrasímetro modificado, onde as condições de corte são bem severas, e a irregularidade do disco de granito gera maiores impactos durante a operação de corte, promovendo o desgaste por fratura frágil. Esse comportamento pode afetar negativamente a vida útil da ferramenta, uma vez que o cristal desgasta alguns vértices de corte, deixando abertura na matriz ligante e possivelmente pode ocorrer destacamento por fadiga de contato. Para melhor entendimento do processo de desgaste de uma ferramenta diamantada, faz-se necessário observar altura de protrusão dos diamantes. Claramente, os cristais de diamantes, com maior altura exposta na matriz conforme visto na Figura 4.46, apresentam maior trabalho de corte, começando a sofrer clivagem e os diamantes com média altura de protrusão começam a colaborar para o processo de corte, conforme se vê na Figura 4.51.

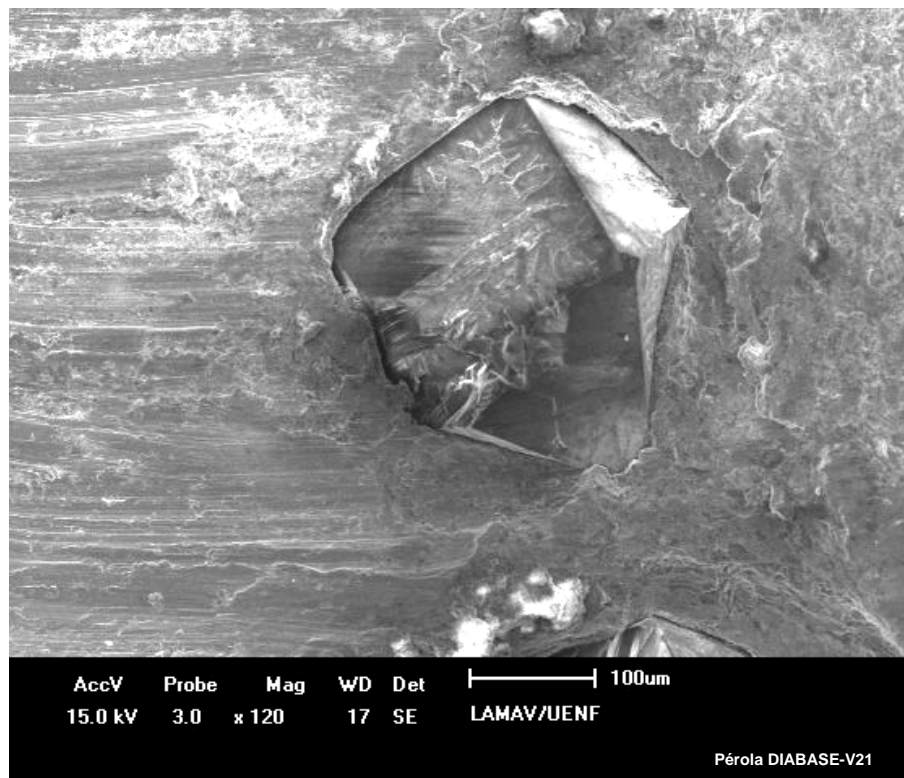


Figura 4.49 – Morfologia de um diamante no compósito DIABASE- V21, após 2 minutos de ensaio de abrasão.

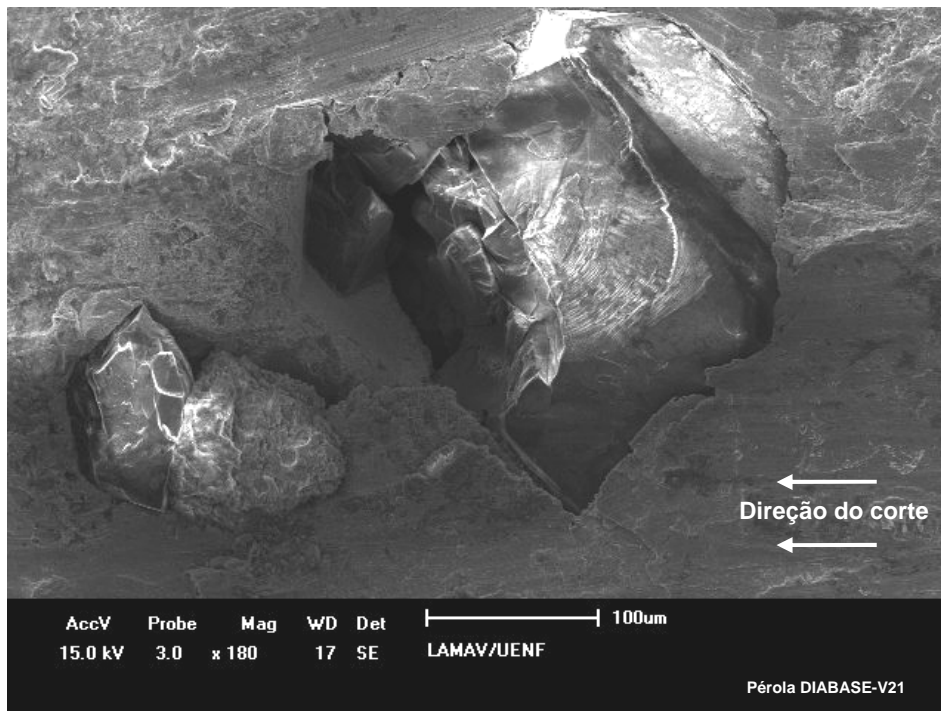


Figura 4.50 - Clivagem por impacto do cristal de diamante no compósito DIABASE-V21, após 2 minutos de ensaio de abrasão.

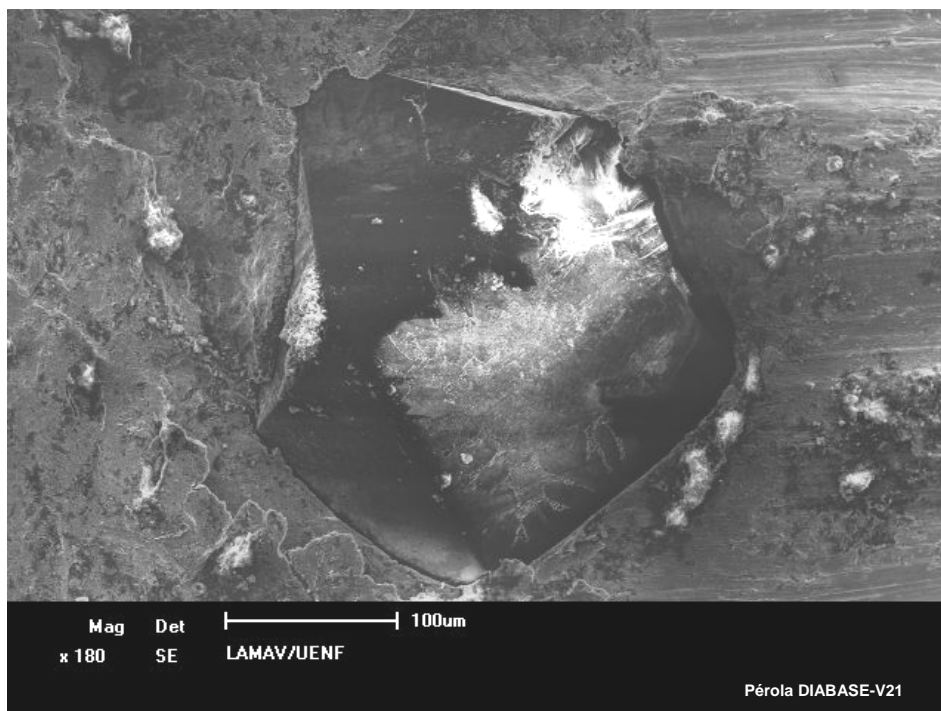


Figura 4.51 - Cristal de diamante de tamanho médio com evidência de dano, após 2 minutos de ensaio de abrasão.

É importante informar mais uma vez, que o processo de desgaste de uma ferramenta de diamantada impregnada é contínuo até o final da vida útil da mesma, onde os cristais de diamantes desgastados ou inaptos na matriz ligante são substituídos devido a fadiga de contato e a constante abrasão com a rocha durante o corte. Conseqüentemente, para eliminação destes mesmos cristais desgastados que não apresentam mais capacidade de corte, são destacados, e ao mesmo tempo surgem novas faces cortantes de novos diamantes que estão nas camadas mais internas, dando continuidade ao processo de corte.

Para o tempo de 6 minutos de ensaio, os cristais de diamantes continuavam bem fixos à matriz metálica, aumentando o número de diamantes clivados, o que é fato positivo para ferramenta e o corte, pois as irregularidades das superfícies de clivagem dos diamantes, mantém o poder de corte devido à auto-afiação. Nas Figuras 4.52 e 4.53, os cristais de diamantes apresentam-se estruturalmente com ótima adesão entre a matriz e o diamante, sendo capazes de segurar o diamante na matriz sob carga, sofrendo degradação em sua superfície, ocorrendo clivagem e pequenas fragmentações. Isso é favorável para o processo de corte, pois dessa maneira o processo de desgaste do compósito diamantado acontecerá gradativamente de maneira moderada, já que o desgaste da matriz ligante por abrasão elimina os cristais já desgastados e descobre os cristais mais internos, fazendo surgir novas faces cortantes, proporcionando assim a continuidade do processo de corte da rocha. (Figura 4.54).

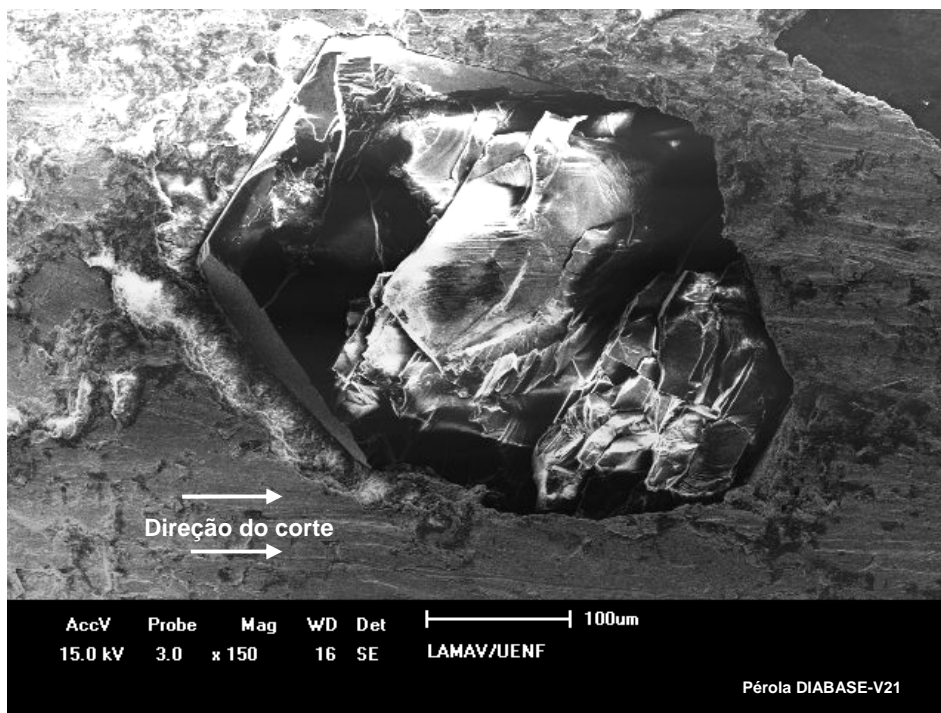


Figura 4.52 – Evidências da clivagem do cristal de diamante do compósito DIABASE-V21, após 6 minutos de ensaio de abrasão.

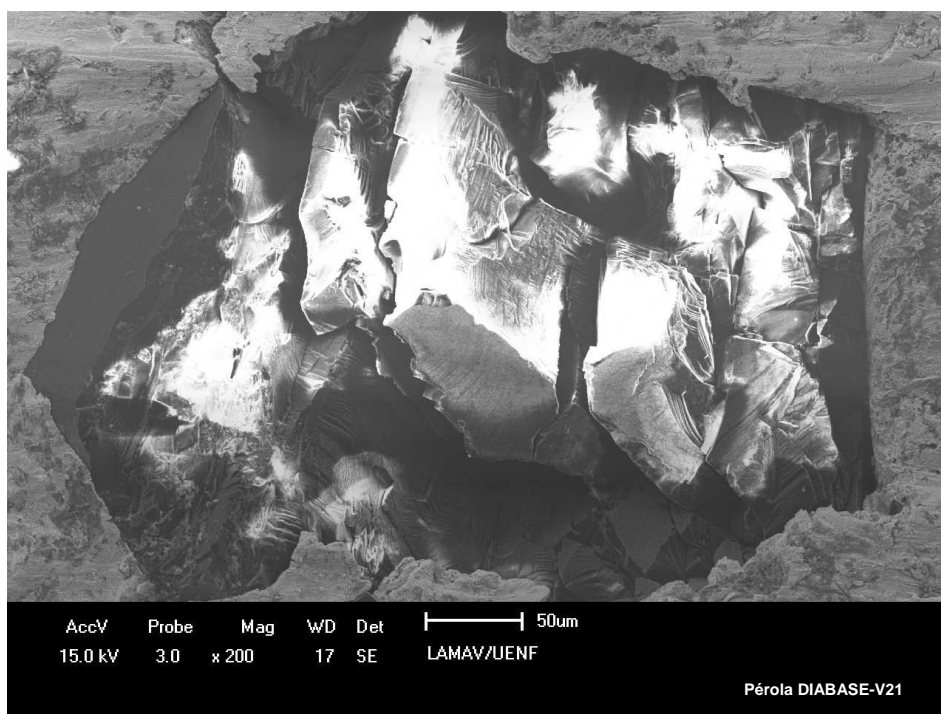


Figura 4.53 – Morfologia do cristal de diamante na matriz ligante de DIABASE-V21, após 6 minutos de ensaio de abrasão.

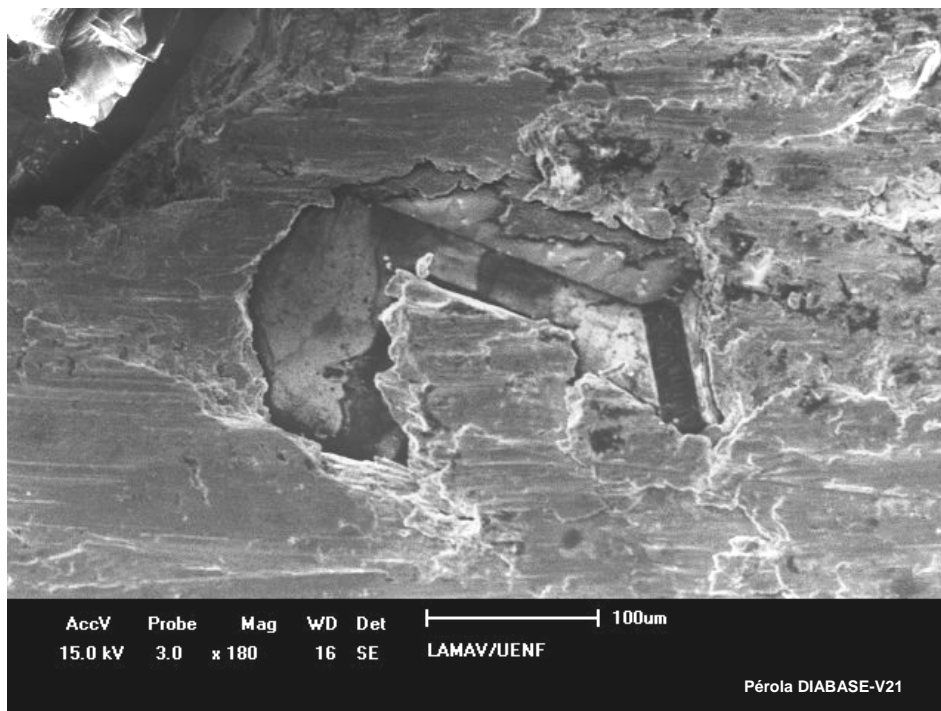


Figura 4.54 - Cristal de diamante no compósito DIABASE-V21, surgindo como nova face cortante para dar continuidade ao corte, após 6 minutos de ensaio de abrasão.

A Figura 4.55 apresenta a morfologia desgastada dos cristais de diamante ao final dos 12 minutos de ensaio de resistência à abrasão. Pode-se observar que três diamantes grandes clivados estão com forte poder de corte. Nota-se, também, a presença de “gap” na matriz ligante no contato com o diamante. Isso acontece devido o carregamento constante que os grãos abrasivos estão expostos durante a operação de corte, e ao fato deste compósito possuir um percentual pequeno de cobalto (Co), cerca de 12,5%p, o que resulta na fraca retenção matriz ligante e diamante. Dessa maneira, Barbosa [2008] menciona que ligas com baixo teor de cobalto não proporcionam formação de solução sólida FeCo (fase dura) suficiente para uma resistência à fadiga satisfatória. Como já mencionado no Capítulo 2.3, o Cobalto é o ligante mais utilizado na fabricação de ferramentas diamantadas de corte, pois possui perfeita compatibilidade química com o diamante nas temperaturas de processamento, uma adequada retenção dos cristais de diamante e excelente resistência ao desgaste.



Na Figura 4.56 pode-se identificar que um cristal de diamante foi completamente destacado ou arrancado do ligante (pull-out), o qual é consequência do processo de desgaste contínuo da pérola diamantada impregnada (vide seta contínua). Este destacamento é um modo de falha da pérola diamantada e consequentemente interfere e compromete a vida útil da mesma. Entretanto o “pull-out” pode ter efeitos positivos para o ótimo desempenho da ferramenta diamantada de corte, desde que aconteça “naturalmente” como uma etapa do processo de desgaste da ferramenta, com destaque ou liberação dos cristais de diamantes quando estes não apresentarem mais capacidade de corte. Isso é importante para o desempenho da ferramenta diamantada, bem como para a evolução e manutenção da taxa de rendimento no processo de corte, pois os cristais desgastados ou sem capacidade de corte são liberados e novos cristais surgem para dar continuidade ao processo de corte nas lavras de rochas ornamentais (vide seta tracejada). Para este tempo de ensaio de 12 minutos, esse comportamento está em perfeita concordância com o mecanismo de desgaste discutido por Davis et al., [1996] e estudado por Oliveira [2009].

A Figura 4.57 apresenta evidências de uma boa adesão do cristal de diamante na matriz ligante como também a auto-afiação do cristal, o qual fica rugoso como resultado da clivagem. A vida útil da ferramenta pode não ser afetada pela quebra por clivagem de diamantes, uma vez que as superfícies clivadas e auto-afiadas, dão continuidade ao processo de corte sem problemas, na maioria das vezes. Já na Figura 4.58 observa-se uma boa ancoragem do diamante pouco desgastado no início de corte, confirmando a adesão satisfatória para o compósito da liga DIABASE-V21. Além disso, pode-se notar o destacamento de um diamante no final do ensaio de resistência à abrasão, culminando com o fechamento de um “buraco” deixado por um cristal que acabou de ser destacado (vide seta).

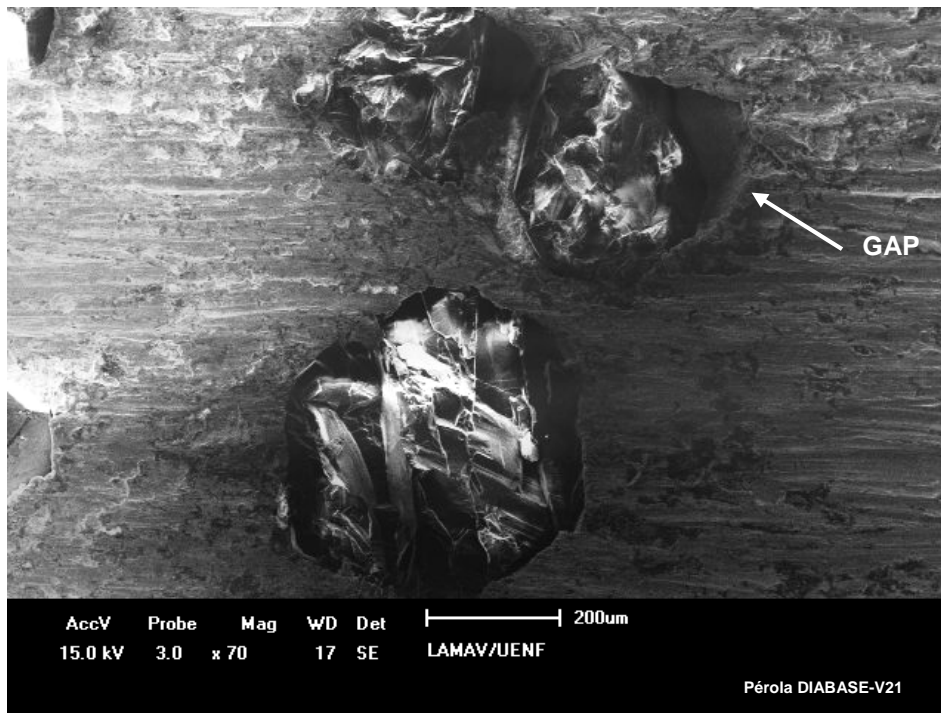


Figura 4.55 - Morfologia de cristais desgastados de diamante no compósito DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.

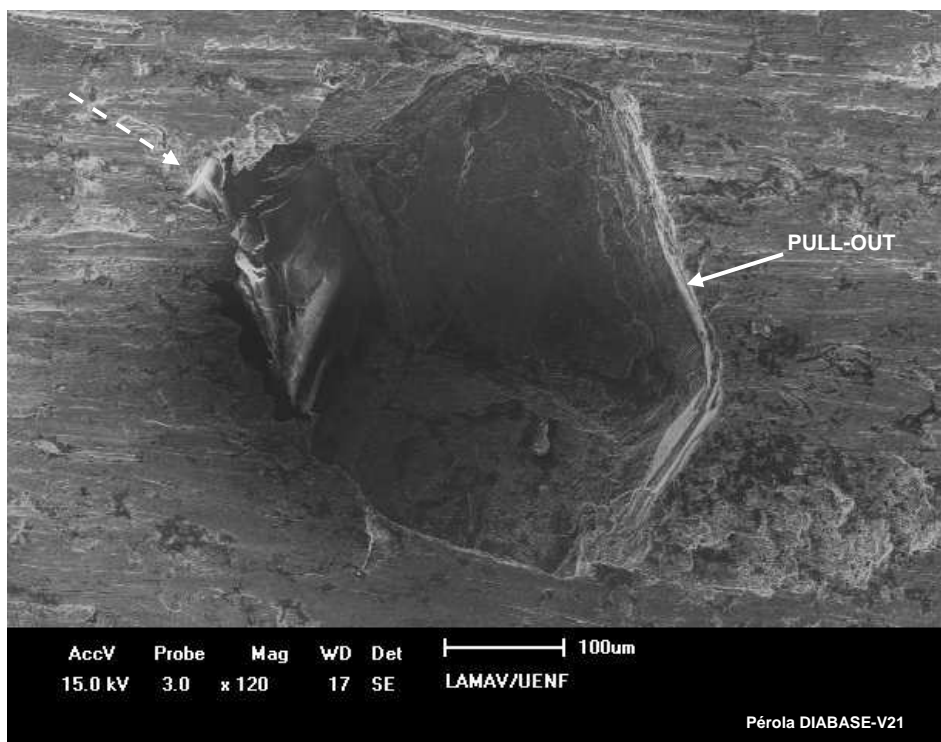


Figura 4.56 – Evidências de desgaste abrasivo por formação de proa antes do destacamento do cristal de diamante do compósito de DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.

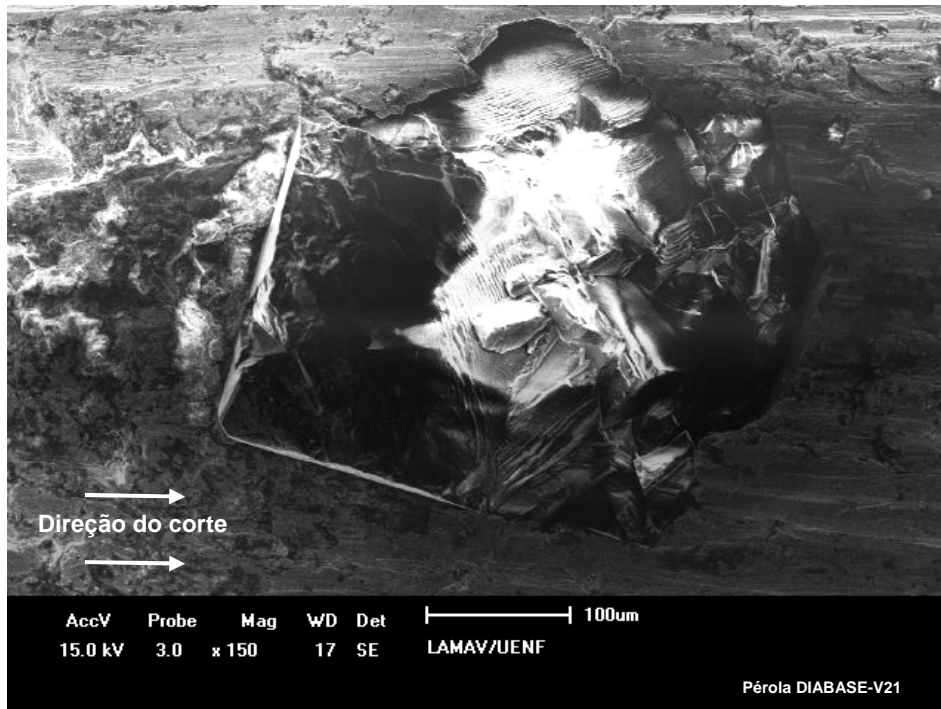


Figura 4.57 – Morfologia de clivagem do cristal de diamante no compósito DIABASE-V21, após 12 minutos de ensaio de abrasão.



Figura 4.58 – Morfologia de desgaste abrasivo do compósito DIABASE-V21, com fechamento de pull-out, após 12 minutos de ensaio de abrasão.

De um modo geral, a matriz metálica (DIABASE-V21) ao sofrer abrasão, as faces cortantes dos diamantes ficaram expostas na superfície do compósito. Sendo que alguns diamantes apresentam altura de protrusão maior que os outros, o que é altamente benéfico para o desempenho e tempo de vida útil da ferramenta. Em seguida, estes diamantes de maior exposição, os quais apresentaram maior corte de trabalho, começaram a clivar ou fragmentar, tornando as faces dos cristais afiadas.

#### **4.8.2- Compósito diamantado Fe-Ni-Cu-Zn-Mn (Pérola Comercial China)**

As Figuras 4.59 a 4.61 apresentadas abaixo, mostram a distribuição dos cristais de diamantes na matriz ligante Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após ensaio de resistência abrasão, ao final dos tempos de 2, 6 e 12 minutos.

Pode-se observar na Figura 4.59, que ocorre um desgaste da matriz metálica, onde as faces cortantes dos diamantes começam a aparecer na matriz, como também o aparecimento de “gap” de separação entre a matriz metálica e o diamante. A partir da Figura 4.60 ocorre desgaste da matriz e destacamento dos cristais de diamantes, conseqüentemente pela fraca adesão dos cristais, ficando mais evidente este fenômeno na Figura 4.61.

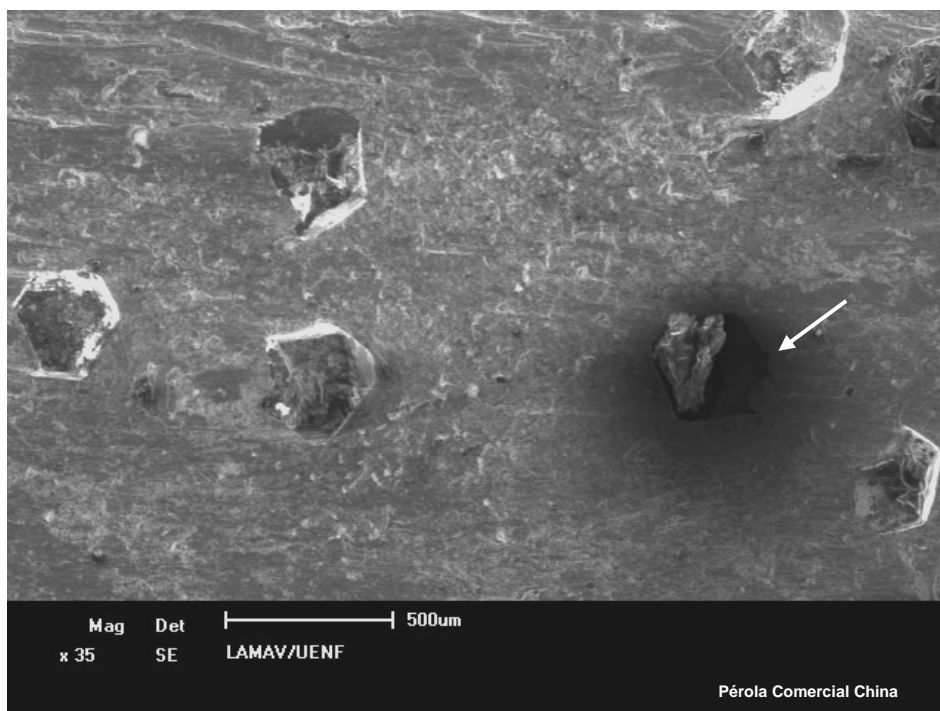


Figura 4.59 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

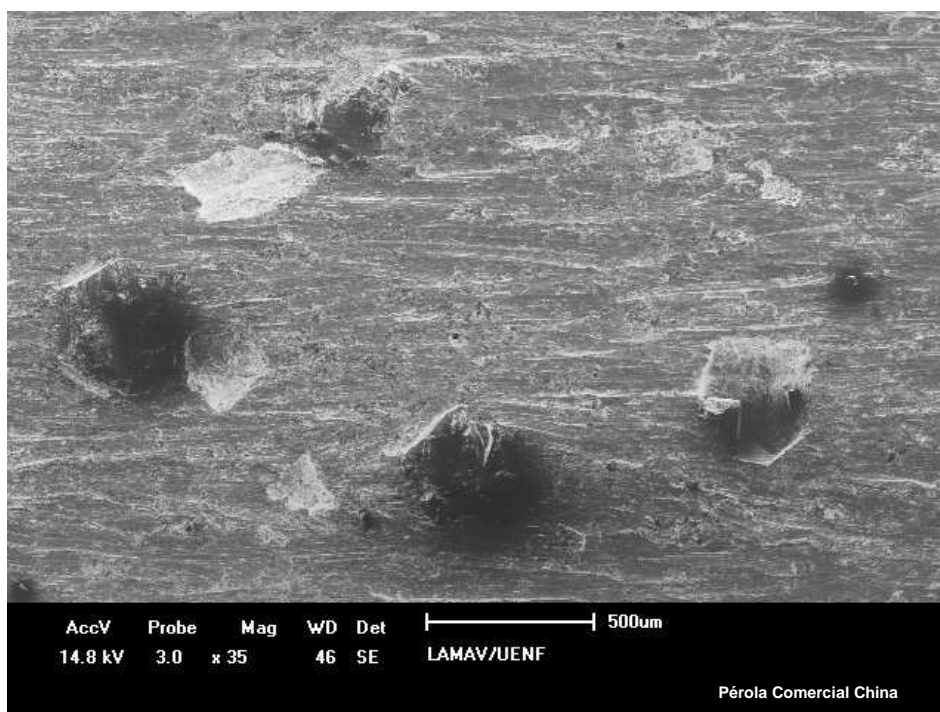


Figura 4.60 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

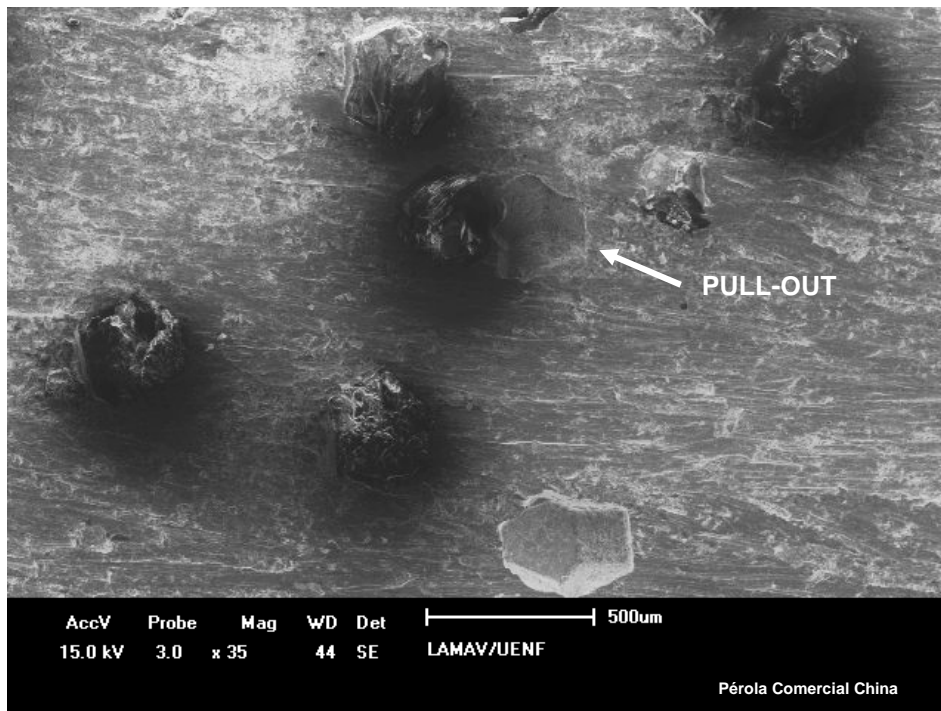


Figura 4.61 - Distribuição de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

Durante os 2 primeiros minutos do ensaio de resistência à abrasão, na Figura 4.62, nota-se que um cristal de diamante foi completamente destacado ou arrancado do ligante (pull-out) não sendo um comportamento normal para este tempo de ensaio. Pode-se perceber pela Figura 4.63 a estrutura do cristal de diamante com trincas, como também danos abrasivos profundos da matriz ligante, formando uma separação entre a matriz e o cristal diamante.

Na Figura 4.64, apesar do cristal de diamante ter uma boa interação com a matriz-diamante, este sofreu degradação por abrasão, gerando clivagem e pequenas fragmentações, podendo ter ocorrido pelo fato de possuir maior altura de protrusão, ficando exposto a uma elevada força de impacto durante a operação de corte, se comportando desta forma, sendo que esta degradação tende a planificar o cristal de diamante com a continuidade do processo de corte.



Figura 4.62 - Estrutura do diamante “pull-out” na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

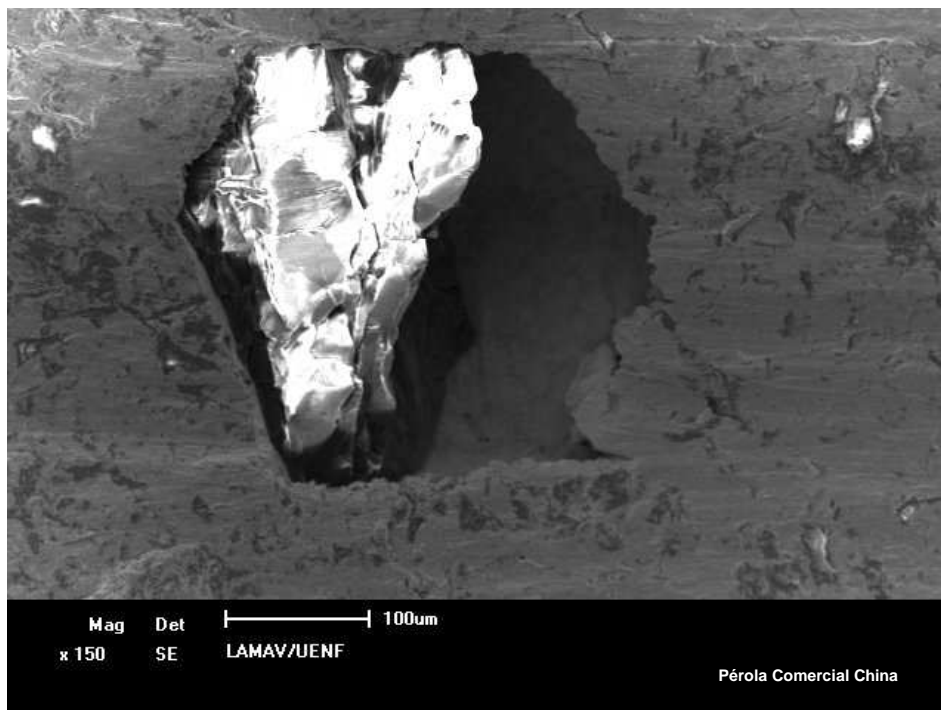


Figura 4.63 – Estrutura dos cristais de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

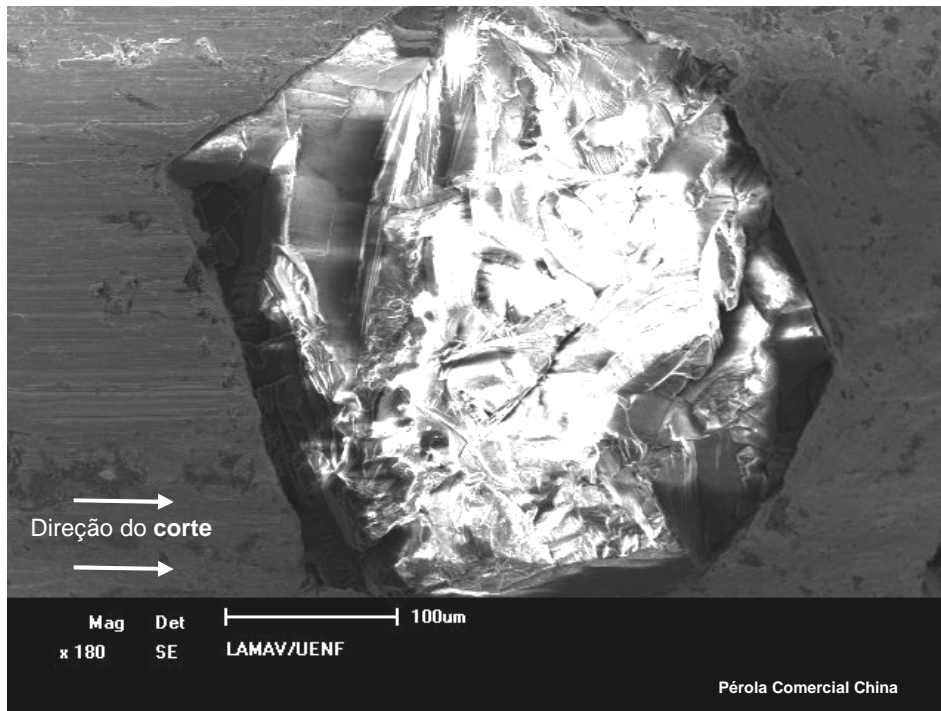


Figura 4.64 - Micrografia mostrando a clivagem de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

Após 6 minutos de ensaio, Figura 4.65, o cristal de diamante com maior altura de protrusão se destacou da matriz ligante, sendo provavelmente facilitado pela pressão de contato de um diamante no outro. Pode-se observar na Figura 4.66 e 4.67 que, devido à elevada força de impacto durante a operação de corte, as superfícies dos cristais de diamantes ficam rugosas como resultado da clivagem, mais não é comum à ocorrência deste fato durante a operação de corte nas lavras de rochas ornamentais por tempos curtos. Cabe informar que neste trabalho as condições de ensaio são mais severas quando comparadas às usadas nas lavras de rochas ornamentais, gerando maiores impactos durante a operação de corte, promovendo clivagem, trincas e desgaste frágil dos diamantes, podendo ocorrer o destacamento dos cristais, afetando negativamente a vida útil da ferramenta de corte, pois se trata de um ensaio acelerado.

O compósito Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), há formação de “gap” ou distância entre o cristal de diamante e a matriz ligante, além do destacamento de cristais de diamantes, que é um modo de falha da ferramenta diamantada, e conseqüentemente interfere e compromete a vida útil da mesma.



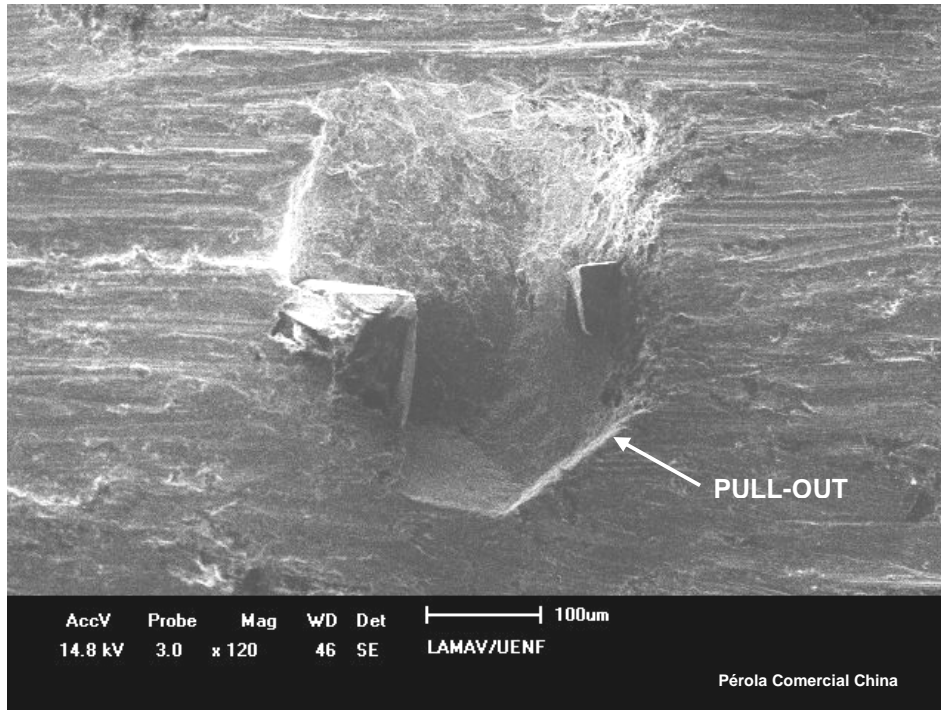


Figura 4.65 – Morfologia do desgaste abrasivo por destacamento do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China) após 6 minutos de ensaio de abrasão.

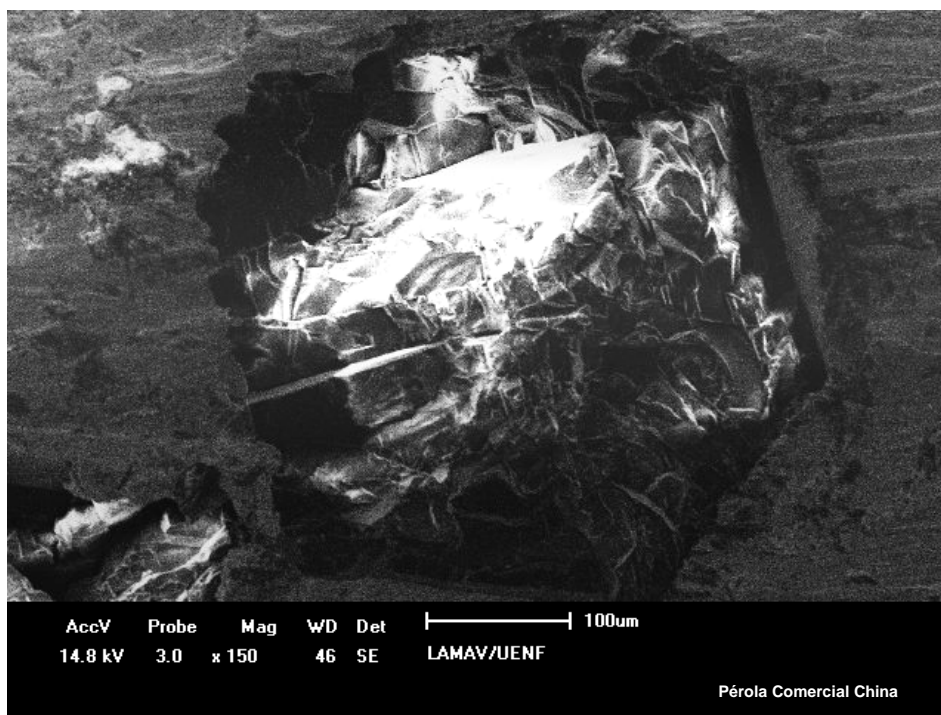


Figura 4.66 - Estrutura do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

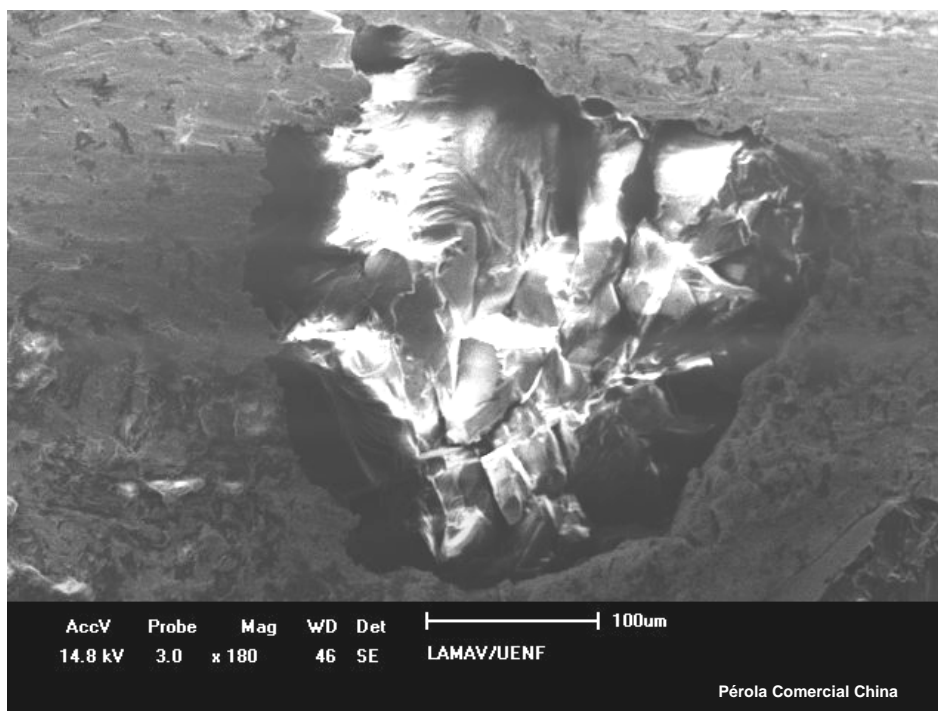


Figura 4.67 – Morfologia do desgaste por clivagem do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

Ao final de 12 minutos de ensaio de resistência à abrasão, o compósito da pérola diamantada comercial China apresentou, mais uma vez, destacamento dos cristais de diamantes, conforme observado pela Figura 4.61.

Na Figura 4.68, o diamante apresenta-se desgastado em sua superfície, alta protrusão e boa adesão à matriz metálica. Foi verificado, também, o destacamento de um cristal de diamante ao lado direito da imagem. Na Figura 4.69, o diamante apresenta desgaste em sua superfície, como também observa-se a presença de “gap” entre o cristal e a matriz ligante. Do lado direito da imagem constata-se a presença de “pull-out” (vide seta).

Após ter sofrido degradação, o cristal de diamante tende a perder sua face cortante e possivelmente pode ocorrer destacamento ou planificação do mesmo, caso continue o trabalho de corte. Na Figura 4.70, apesar do cristal ter uma boa interação matriz-diamante, ocorre pequena formação de “gap” no lado direito da imagem, ou seja, fadiga devido à deformação plástica ocorrida na matriz durante esforço mecânico. Além disso, o cristal de diamante sofreu desgaste por abrasão, gerando clivagem, podendo ter ocorrido pelo fato de possuir maior altura de protrusão, sendo que esta degradação tende a planificar o cristal de diamante.

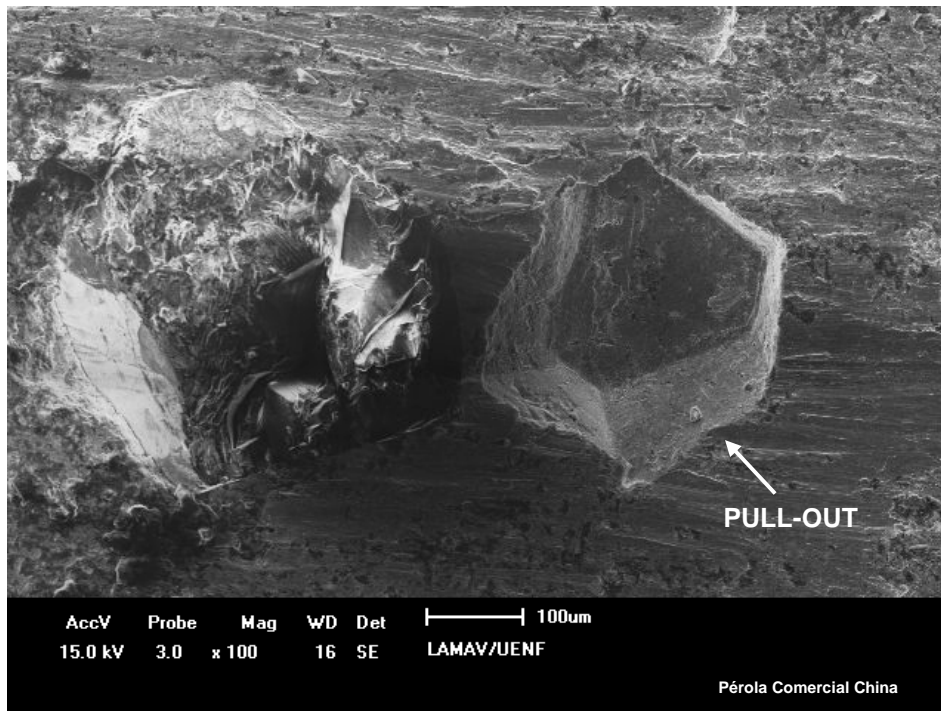


Figura 4.68 – Morfologia do desgaste de cristais de diamantes na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

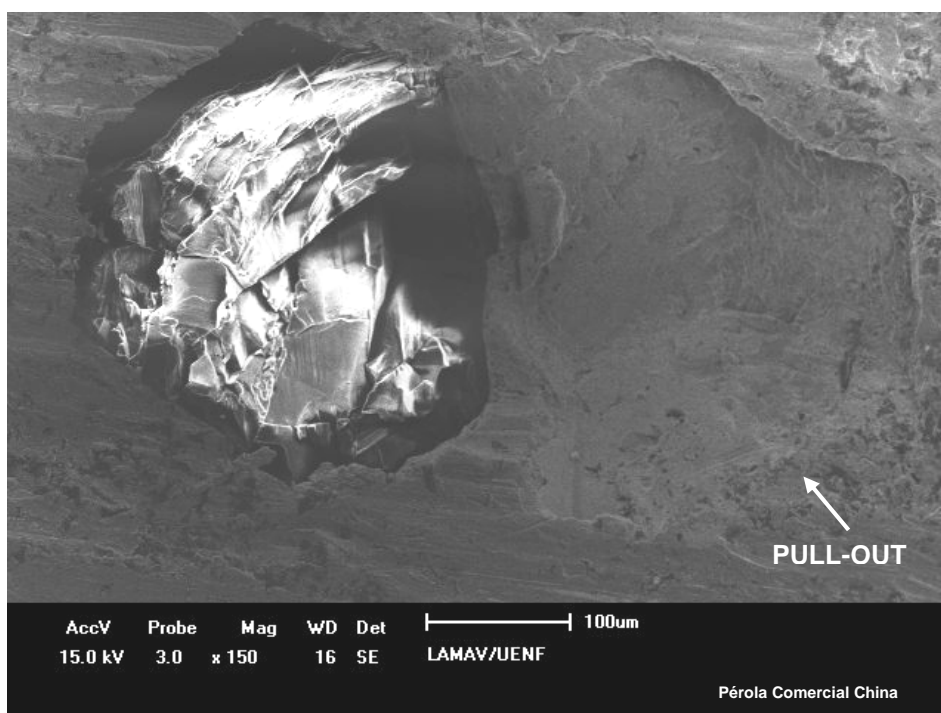


Figura 4.69 – Morfologia do desgaste por destacamento do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

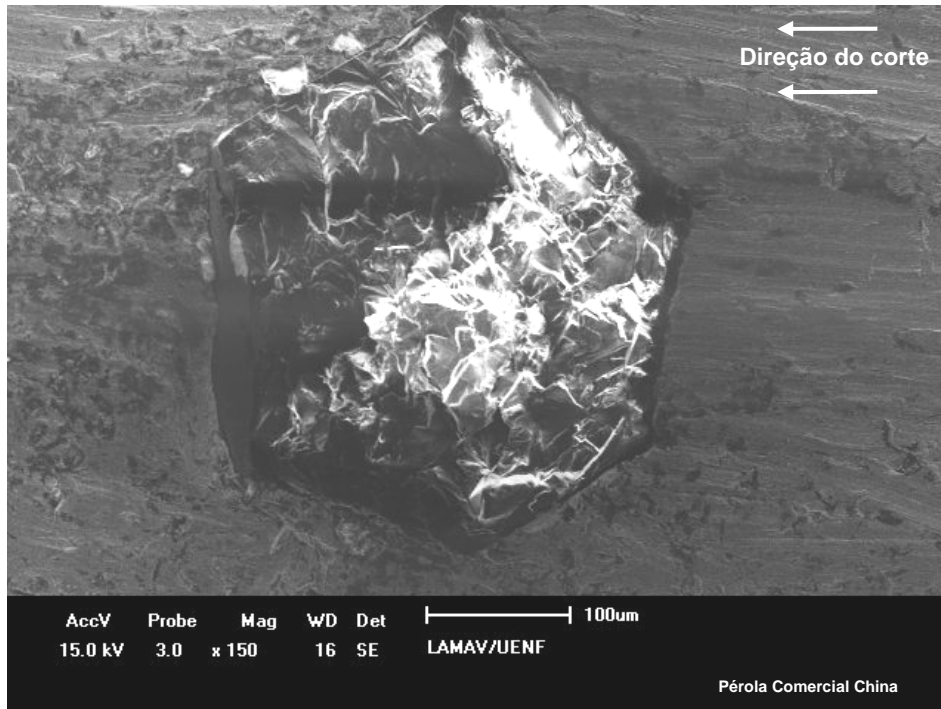


Figura 4.70 – Morfologia do desgaste do cristal de diamante na matriz metálica Fe-Ni-Cu-Zn-Sn-Mn (pérola comercial China), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

Pode-se observar que para todos os tempos de ensaio de abrasão da pérola comercial China, aconteceu “pull-out” ou destacamento de cristais de diamantes do compósito diamantado. Como já dito anteriormente, esse destacamento é um modo de falha da ferramenta diamantada e, conseqüentemente, interfere e compromete a vida útil da mesma. Provavelmente, este fenômeno aconteceu com frequência devido o pequeno número de solução sólida presente na liga desta pérola comercial, como pode ser depreendido a partir do difratograma da Figura 4.8. Cabe mais uma vez ressaltar que a solução sólida proporciona dureza à liga metálica, e melhora a adesão matriz-diamante.

Além disso, os cristais de diamantes com revestimento são protegidos de substâncias agressivas das matrizes metálicas, e reduz a ocorrência de cristais de diamantes serem arrancados das matrizes metálicas, aumentando assim a utilização de cada um dos cristais das matrizes, proporcionando maior vida útil à ferramenta e evitando a degradação do diamante de reatividades químicas [Oliveira, 2005; De Châlus, 1994].

### **4.8.3- Compósito diamantado Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (Pérola Comercial África do Sul)**

As Figuras 4.71 a 4.73 apresentam a distribuição dos cristais de diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni, após ensaio de resistência à abrasão, ao final dos tempos acumulados de 2, 6 e 12 minutos, bem como alguns mecanismos de desgaste.

Os cristais de diamantes na matriz metálica possuem diferentes alturas de protrusão, aumentando à medida que decorre o tempo de ensaio de desgaste do compósito pois, durante o ensaio a matriz ligante é desgastada para expor as faces cortantes dos cristais e liberar novos diamantes.

Analisando o ensaio para o tempo de 2 minutos, observa-se a distribuição dos diamantes, com diferentes alturas, exposta sobre a matriz ligante, intactos e pouco desgastados, indicando o início do processo de corte (Figura 4.71). Na Figura 4.72, após 6 minutos de ensaio, os cristais de diamantes estão clivados devido à elevada força de impacto durante o corte, promovendo o desgaste por fratura frágil e destacamento do diamante. Já finalizando o ensaio aos 12 minutos de resistência à abrasão, os diamantes se encontram bastante danificados, porém novas faces cortantes são observadas (vide seta da Figura 4.73).

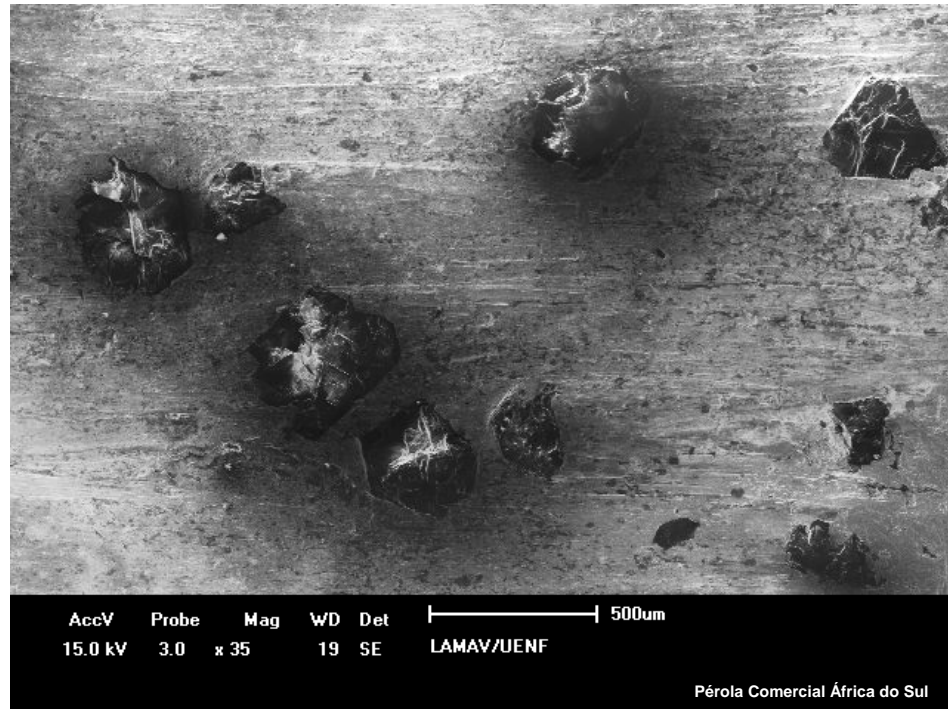


Figura 4.71– Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

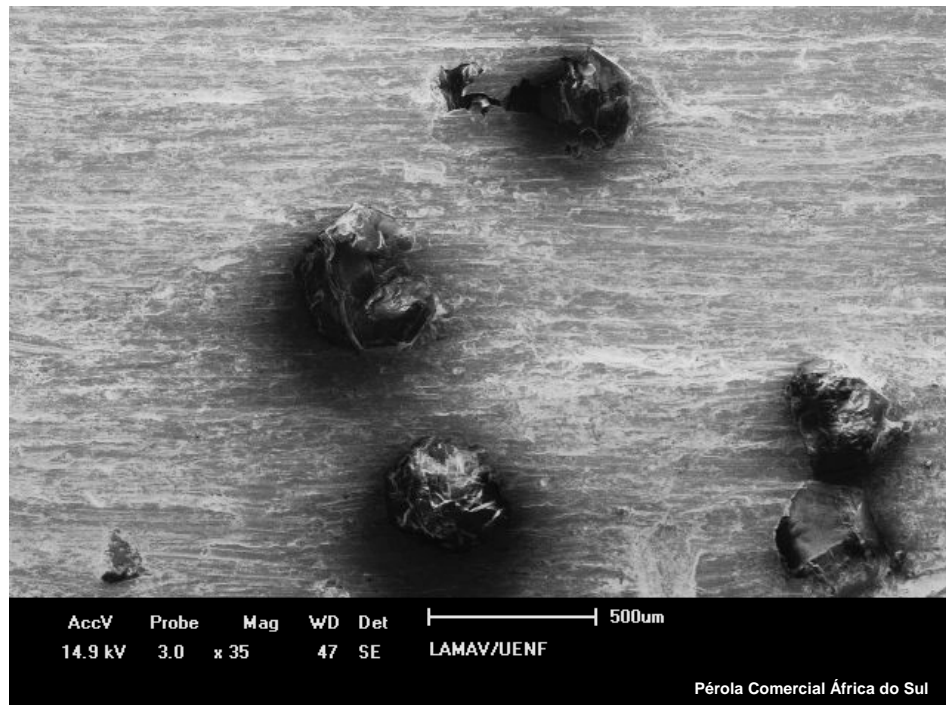


Figura 4.72– Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

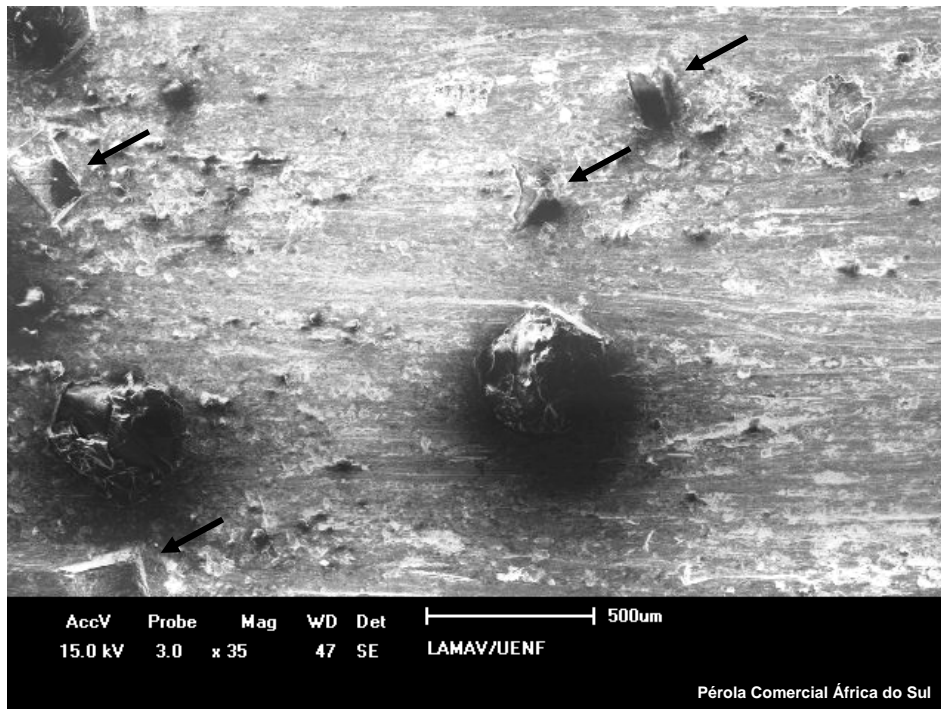


Figura 4.73 – Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

Durante os 2 primeiros minutos do ensaio de resistência à abrasão, Figura 4.74, ocorrem um desgaste da matriz ligante, onde as faces cortantes dos cristais de diamantes clivados começaram a aparecer na matriz, provavelmente por ter maior altura de protrusão satisfatória para propiciar o corte da rocha, sem existência de “gap” de separação entre a matriz e o diamante, sugerindo um ótimo trabalho de acomodação e retenção dos cristais. Na Figura 4.75 pode-se visualizar a presença de pequenas fragmentações na superfície do diamante, provavelmente devido à elevada força de impacto na zona de corte durante o ensaio. Além disso, observa-se o desgaste da matriz.

Vale ressaltar mais uma vez, que o processo de desgaste da matriz metálica é importante para o processo de corte da ferramenta diamantada, pois dessa maneira o processo de desgaste do composto diamantado acontecerá gradativamente moderado. Sendo assim, as faces cortantes dos diamantes clivados e auto-afiadas realizam o trabalho de corte da rocha, retirando cavaco.



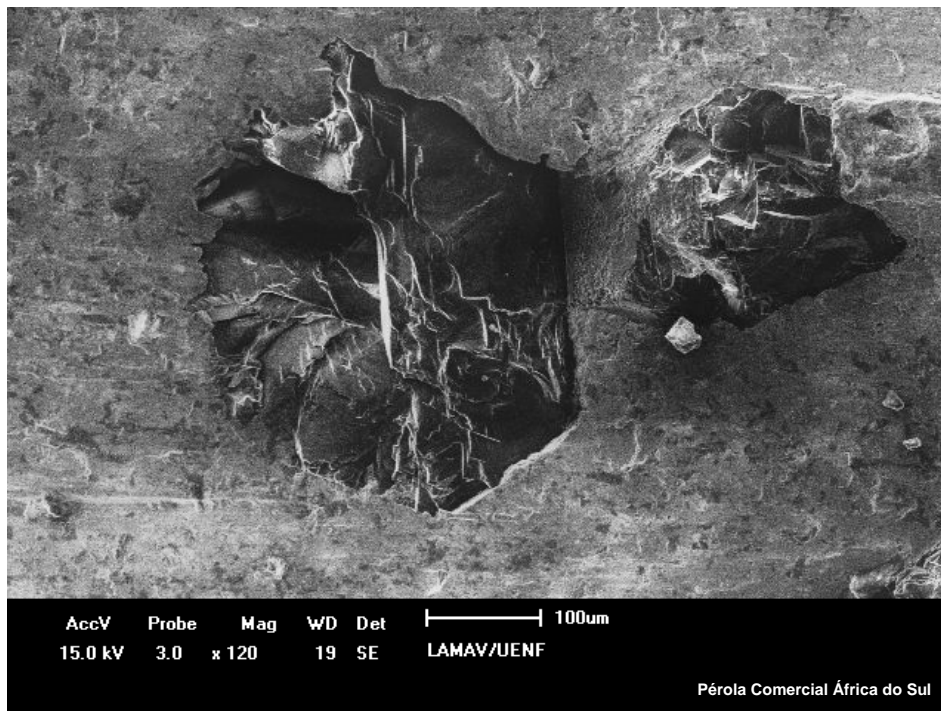


Figura 4.74 – Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

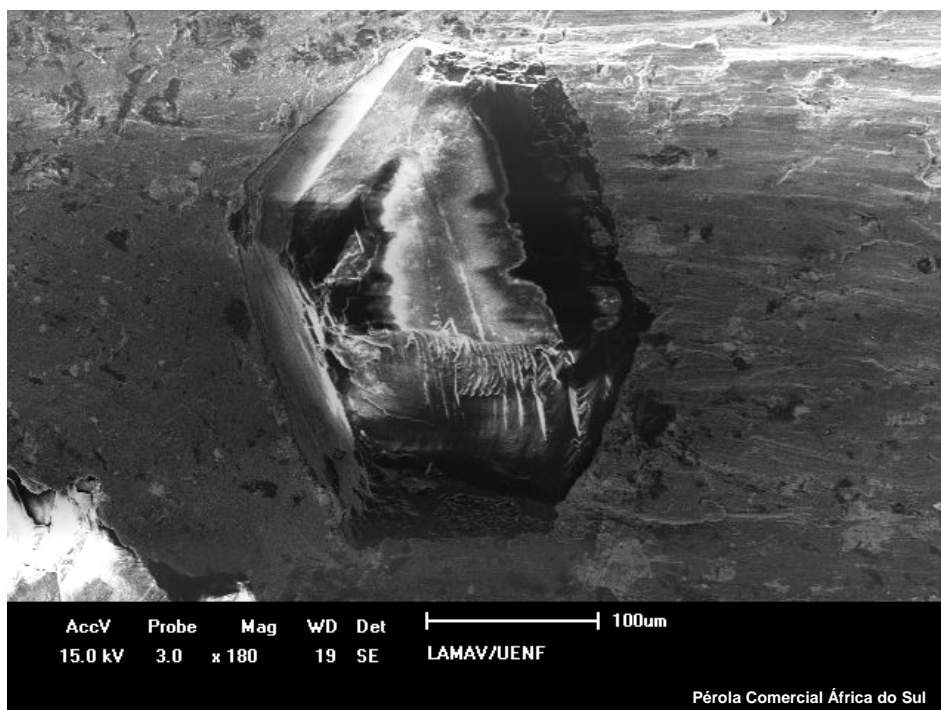


Figura 4.75 – Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 2 minutos de ensaio de abrasão.



Observando a Figura 4.76, os cristais de diamantes com diferentes alturas de protrusão, bem retidos à matriz metálica tem condições de realizar o trabalho de corte. Além de sofrer degradação por clivagem os cristais de diamantes, para este tempo de 6 minutos de ensaio, revelam a capacidade do compósito em liberar novos diamantes. Os diamantes com maior altura exposta na matriz ligante, conforme mostra a Figura 4.77, sofrem maior degradação no trabalho de corte, ocorrendo trinca na superfície do cristal, clivagem e fragmentações. Mas, como o processo de desgaste é contínuo, a vida útil da ferramenta pode não ser afetada pela quebra por clivagem dos cristais, uma vez que as superfícies auto-afiadas contribuem para o processo de corte. Foi verificado neste tempo de ensaio o destacamento “(pull-out)” de um diamante, conforme mostra Figura 4.78. Como já dito anteriormente, o pull-out é um modo de falha da ferramenta diamantada e conseqüentemente interfere e compromete o desempenho da mesma.

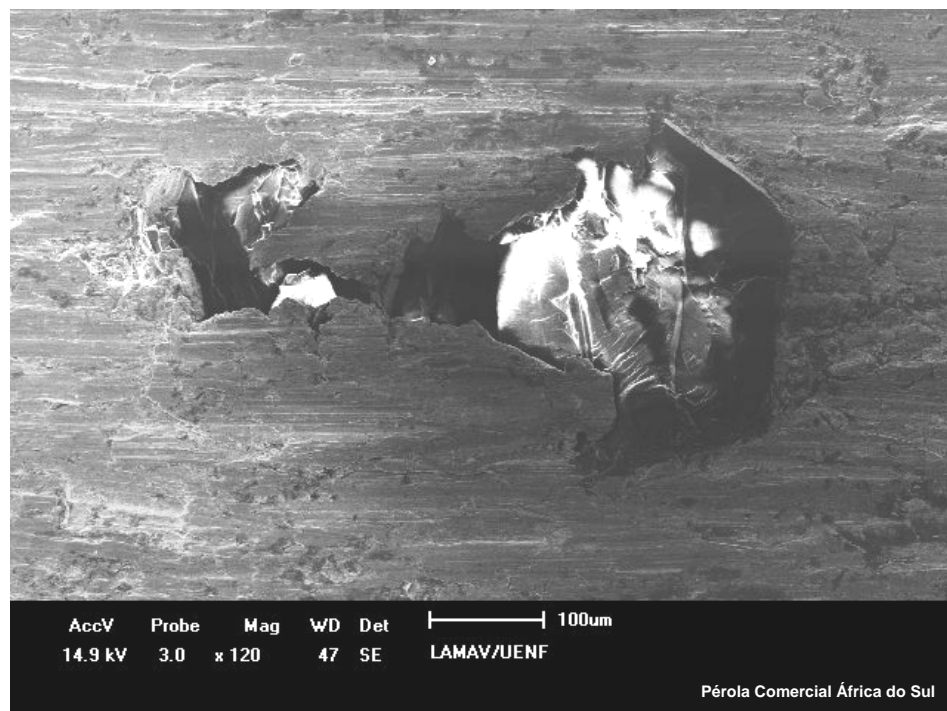


Figura 4.76 – Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

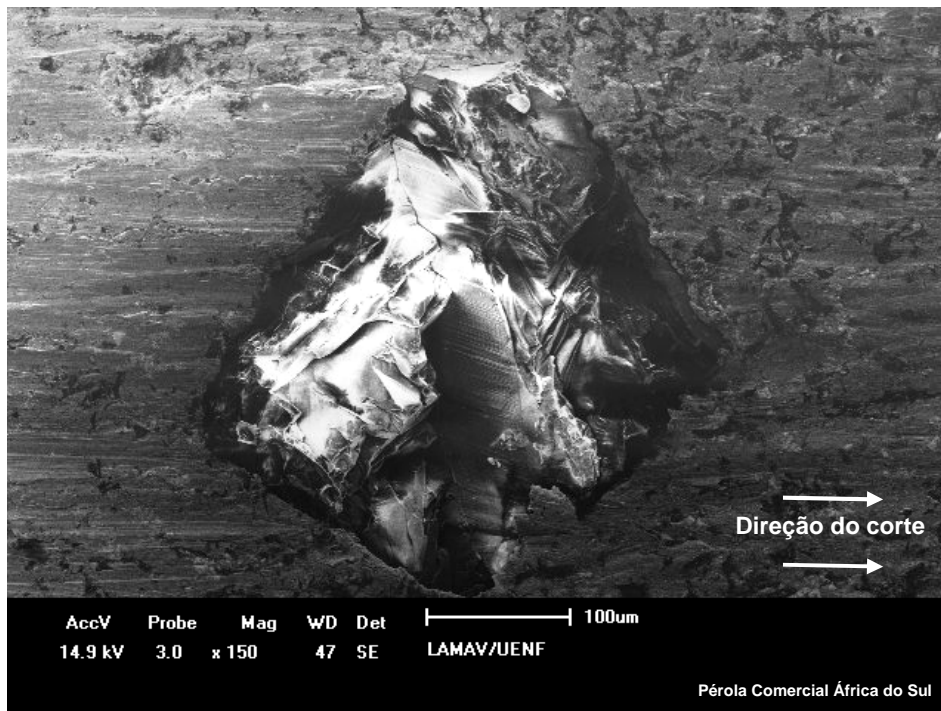


Figura 4.77 – Morfologia do desgaste por clivagem de diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

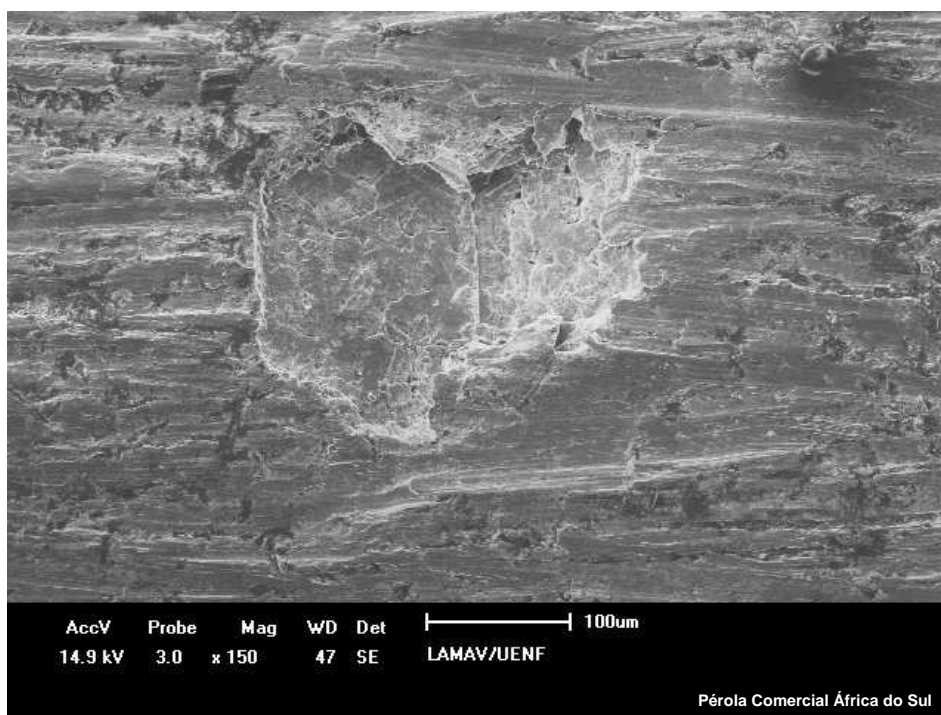


Figura 4.78 – Desgaste evidenciando a falha na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

Nas Figuras 4.79 e 4.80, os diamantes revelam bem degradados devido ao desgaste sofrido ao final dos 12 minutos de ensaio. Pode-se ver, em maiores detalhes, que as superfícies dos cristais de diamantes estão clivadas, fraturadas e trincadas, mas sem a existência de “gap” de separação entre o cristal e a matriz ligante. Pode-se notar que os cristais têm alguns vértices de corte desgastados, pelas condições severas do ensaio de abrasão, promovendo o desgaste por impactos na zona de corte. Possivelmente, pode ocorrer destacamento ou planificação desses diamantes, caso continue o trabalho de corte.

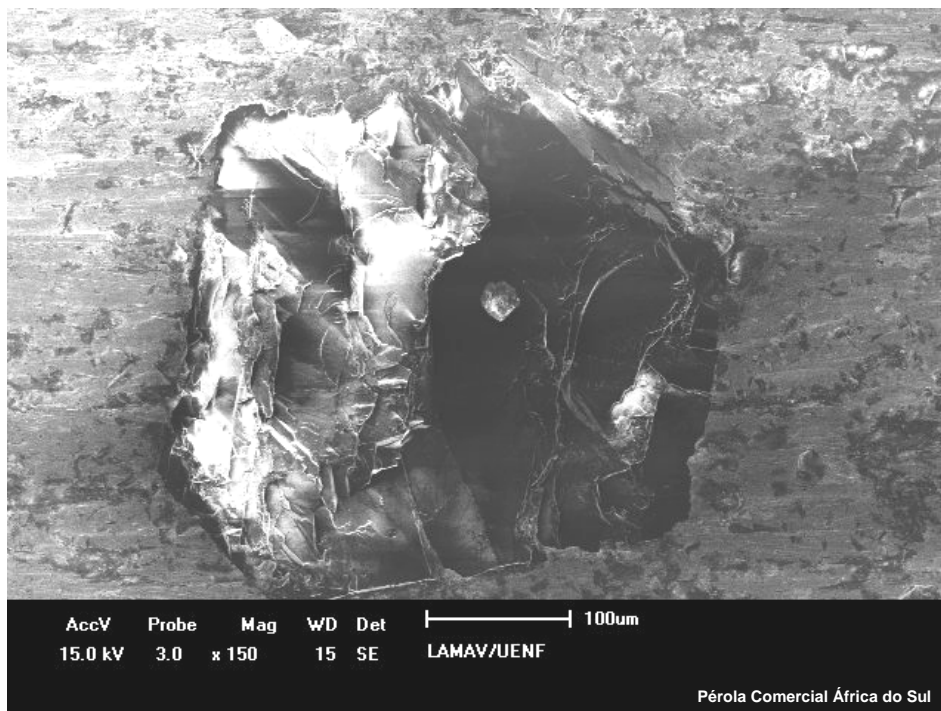


Figura 4.79 – Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.



Figura 4.80 – Morfologia do desgaste por clivagem dos diamantes na matriz metálica Cu-Fe-Zn-Sn-Ni (pérola comercial África do Sul), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

#### 4.8.4- Compósito diamantado Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola Comercial Itália)

As Figuras 4.81 a 4.83 mostram as evidências do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (pérola comercial Itália), para os diferentes tempos de ensaio de resistência à abrasão do compósito. Para 2 minutos de ensaio, aparecem os primeiros cristais de diamantes, que dão início ao processo de corte (Figura 4.81). Como consequência da continuação do ensaio, na Figura 4.82 evidências de falha na matriz ligante e os cristais de diamantes estão fragmentados, indicando a capacidade de corte dos cristais. Já na Figura 4.83, finalizando este processo de desgaste, observa-se a presença de novas faces cortantes dos diamantes, substituindo aqueles que foram destacados ou arrancados da matriz ligante.

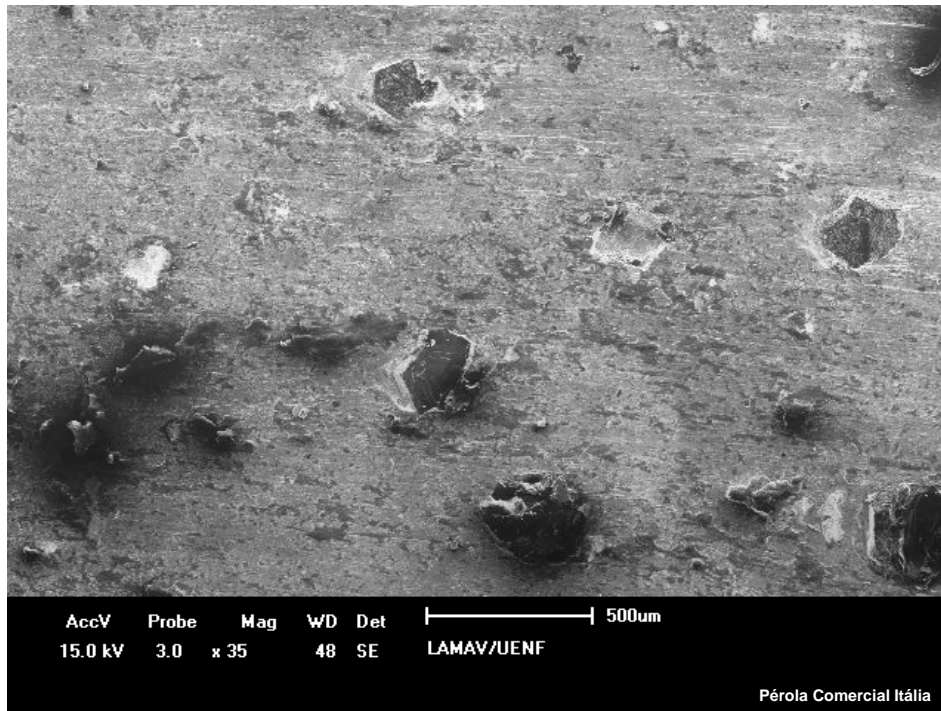


Figura 4.81 – Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

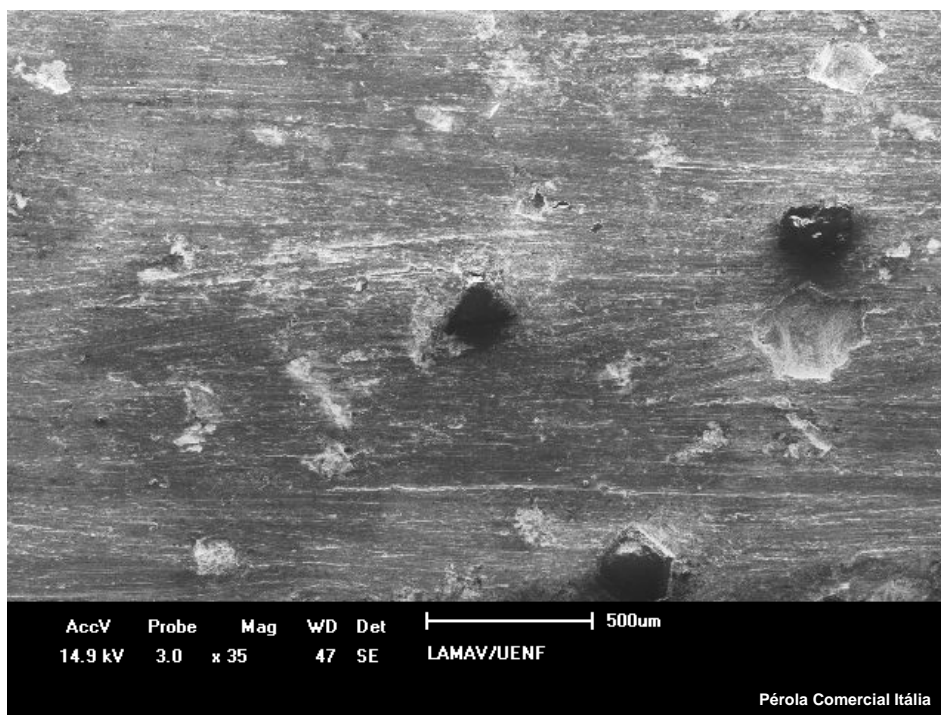


Figura 4.82 – Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

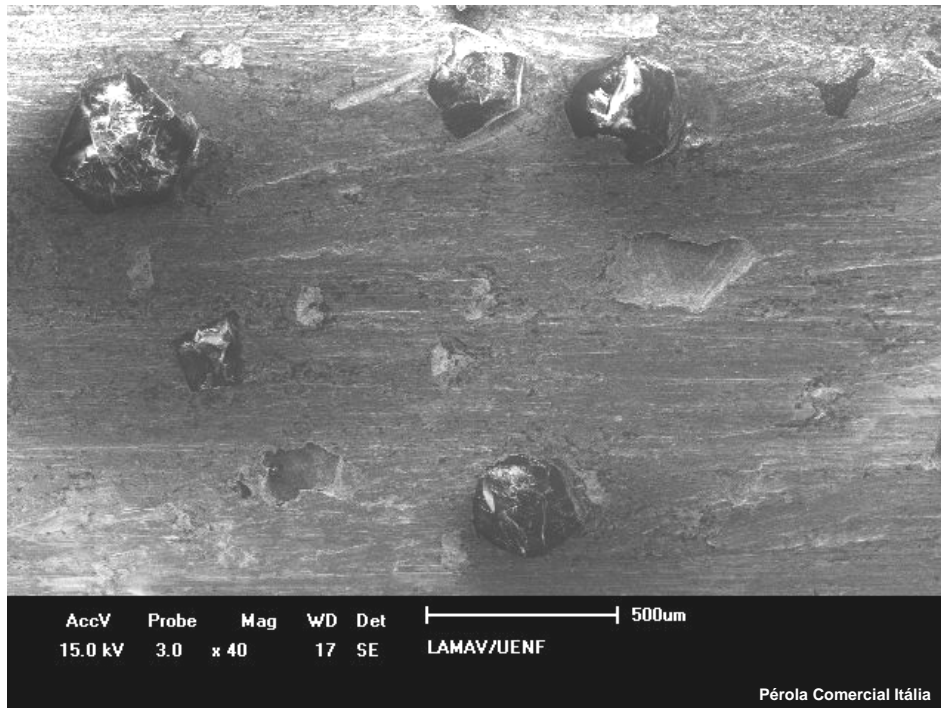


Figura 4.83 – Morfologia do desgaste e distribuição dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

Em maiores detalhes, a Figura 4.84 apresenta a estrutura dos cristais de diamantes para o tempo de 2 minutos, onde um diamante apresenta-se clivado e fragmentado, resultado dos elevados impactos sofrido durante o ensaio de desgaste por abrasão. Na Figura 4.85 é possível observar que o cristal de diamante foi arrancado da matriz, deixando fragmentos encravados na matriz metálica. É mais uma vez importante ressaltar que a ocorrência deste fenômeno não é comum durante os primeiros minutos de operação de corte nas jazidas de rochas ornamentais, pois neste trabalho as pérolas diamantadas foram submetidas ao ensaio de resistência à abrasão em um abrasímetro modificado utilizando uma força vertical sobre as amostras de 2 kgf, pois se trata de um ensaio acelerado, a fim de avaliar as condições microestrutural do composto diamantado ao final de cada tempo de desgaste.

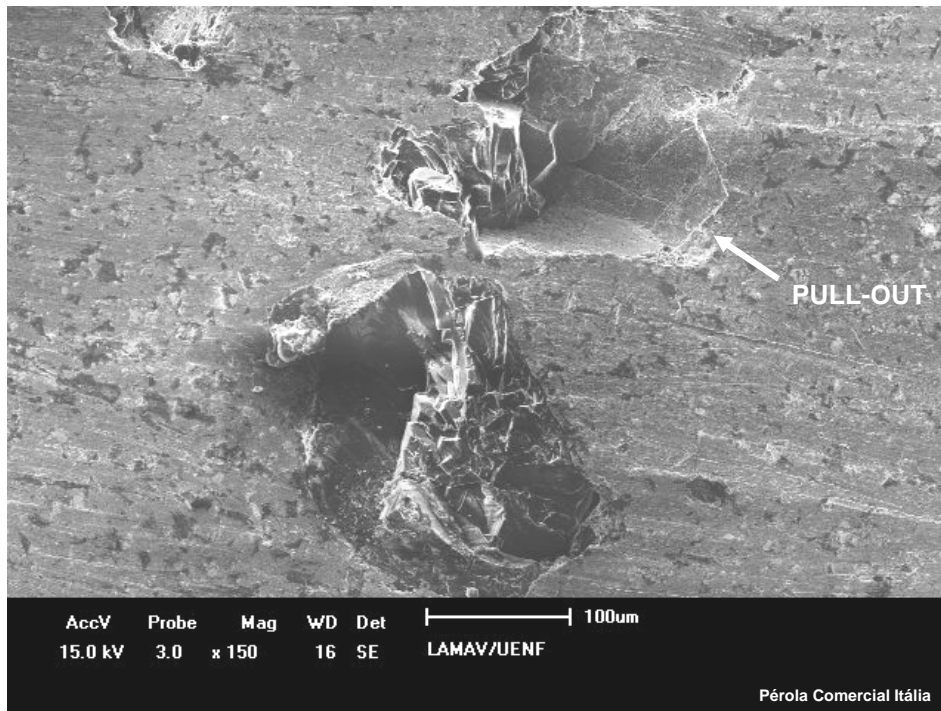


Figura 4.84 – Morfologia do desgaste e estrutura dos cristais de diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.

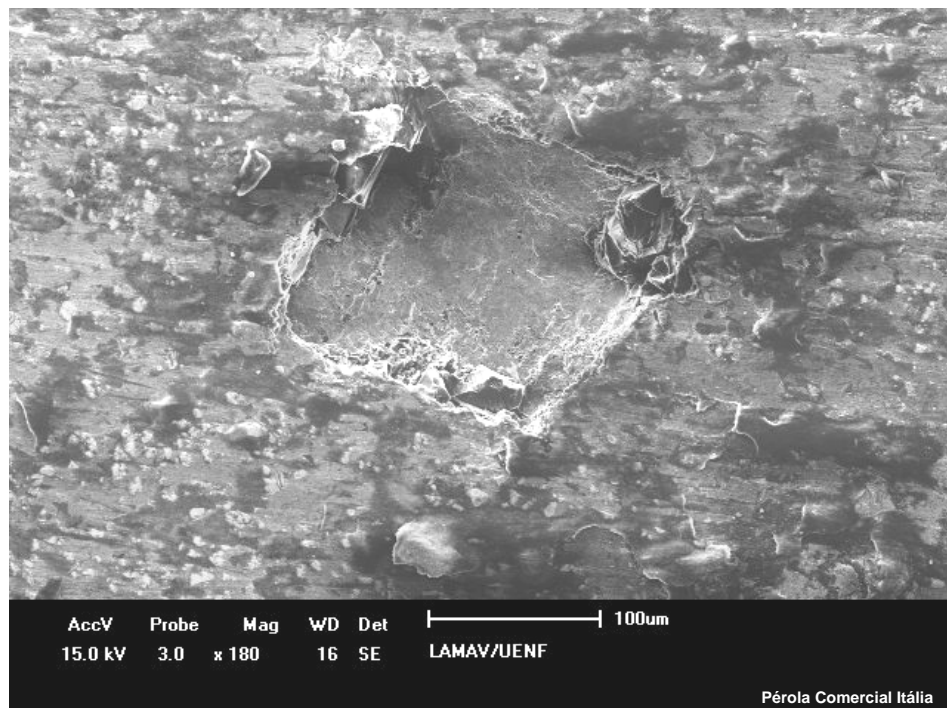


Figura 4.85 – Morfologia do desgaste por destacamento do cristal de diamante na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 2 minutos de ensaio de abrasão.



Após 6 minutos de ensaio, o cristal de diamante mostrado na Figura 4.86 sofreu fratura frágil devido aos impactos e tensões impostas durante o ensaio em contato com a rocha de granito. Na parte inferior da mesma micrografia mostra-se o destacamento de um diamante, deixando o respectivo “vazio” na matriz metálica. Isso acontece devido ao fato que o grão abrasivo fica exposto a um carregamento constante durante a operação de corte, de modo que com os impactos gerados, os diamantes forçam a matriz ao redor de suas faces podendo se desprender ou gerar “gaps”, conforme é visto na Figura 4.87.

O teor elevado do composto carbeto de tungstênio-WC (11%p W) na composição da pérola comercial Itália, conseqüentemente pode ter elevado a dureza do compósito diamantado. Segundo Oliveira, H.C.P [2010] se o ligante tiver uma dureza muito alta, a matriz poderá sofrer fratura, e com adição de diamantes, estes não conseguirão se manter fixados na matriz metálica durante o corte, o que prejudicaria no beneficiamento das rochas ornamentais.

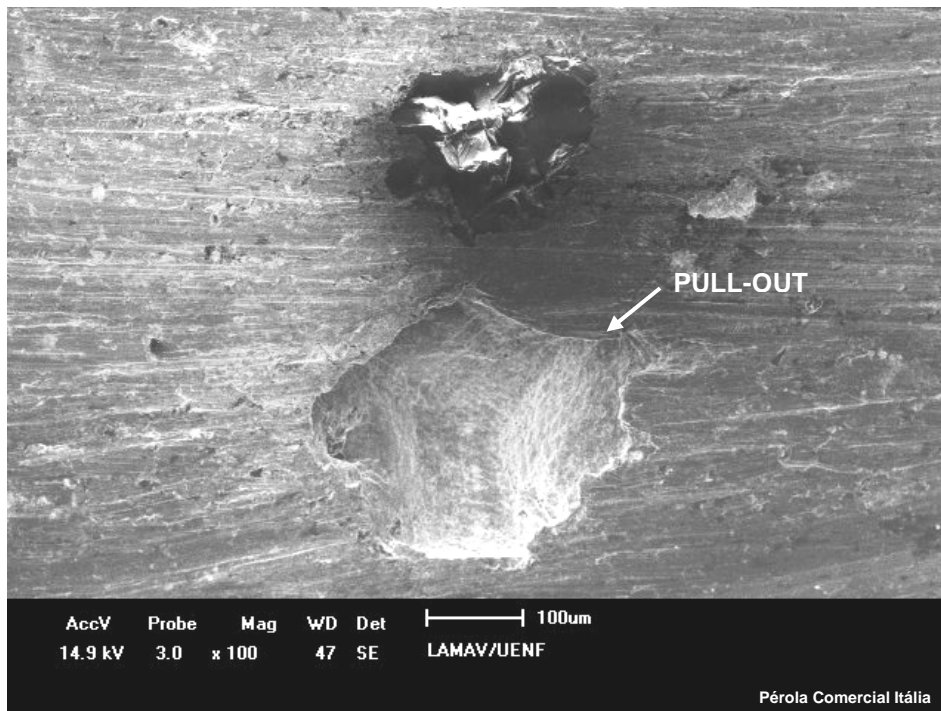


Figura 4.86 – Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.



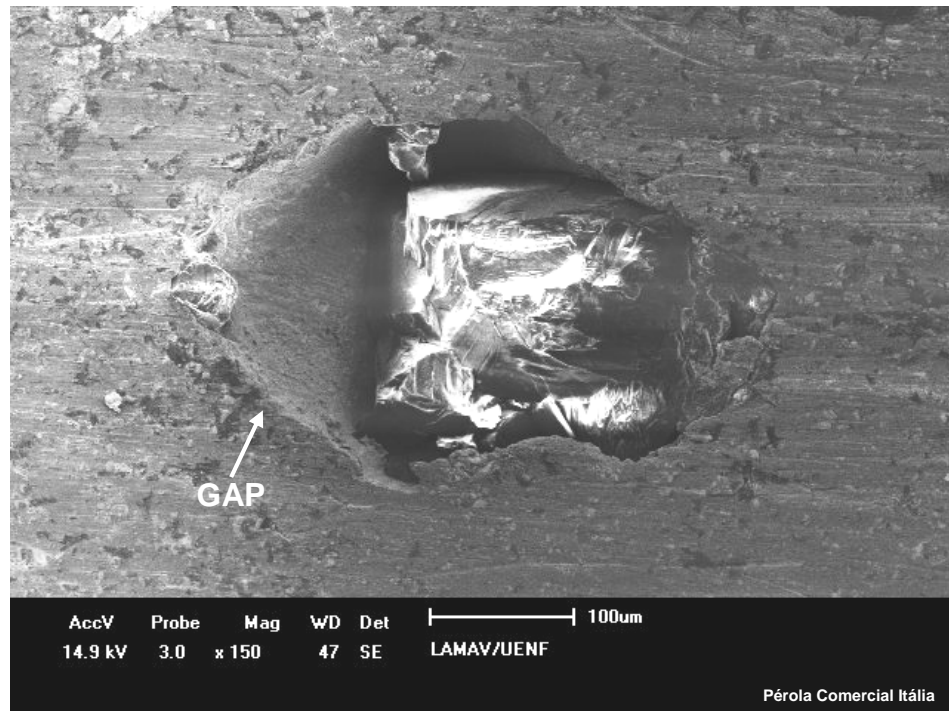


Figura 4.87 – Morfologia do desgaste evidenciando o “gap” entre o diamante e a matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 6 minutos de ensaio de abrasão.

De Châlus [1994] analisou algumas características da retenção dos cristais de diamantes utilizando pós metálicos, ressaltando que para uma ótima produtividade e eficiência de corte, a matriz deve ter boas propriedades mecânicas, pois durante a operação de corte, os diamantes estão sujeitos a tensões pelo contato direto com o material de corte. Pode-se dizer que uma boa adesão entre a matriz e o diamante é encontrada quando não há deformação da matriz, ou somente deformação reversível (elástica), permitindo que a matriz retorne a sua forma inicial quando a tensão cessa como mostrada na Figura 4.88 (a). Entretanto, se essa deformação não é reversível (deformação plástica), com a constante movimentação do diamante devido às tensões geradas, vai haver formação de “gap” entre a matriz e o diamante por fadiga da matriz (Figura 4.88 b).

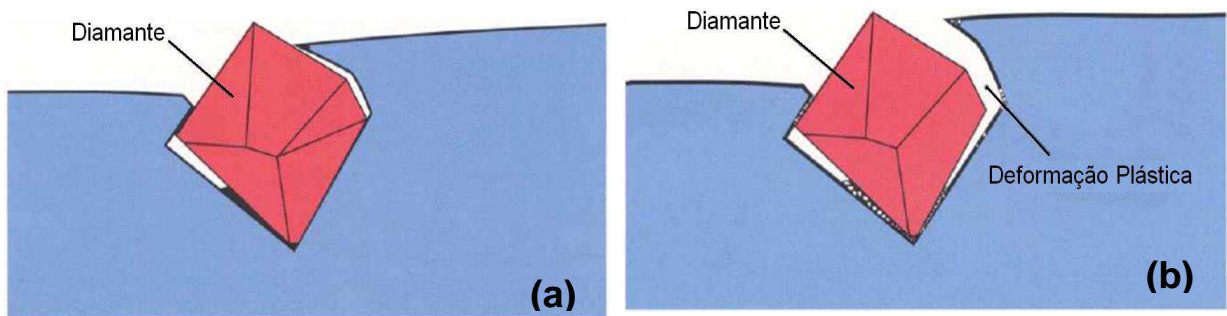


Figura 4.88 - Deformação da matriz ligante. Figura: (a) deformação elástica; (b) deformação plástica [De Châlus, 1994].

Com 12 minutos de ensaio, Figura 4.89, os cristais de diamantes revelam bastante degradados, provavelmente por ter maior altura de protrusão. No lado esquerdo da imagem observa-se o destacamento de um cristal de diamantes (vide círculo), porém é possível também visualizar o surgimento de um novo cristal que se encontra embebido na matriz ligante (vide seta). Na Figura 4.90 o diamante desgastado tende a planificar, finalizando com destacamento do mesmo ou aparecimento de “gap” de separação entre a matriz e o grão abrasivo.

É de fundamental importância observar que, quando da operação de corte, as ferramentas diamantadas estão submetidas a constantes impactos mecânicos, aos quais conduzem à fadiga. Desta forma, é fundamental a seleção de um ligante adequado, para adesão dos diamantes.

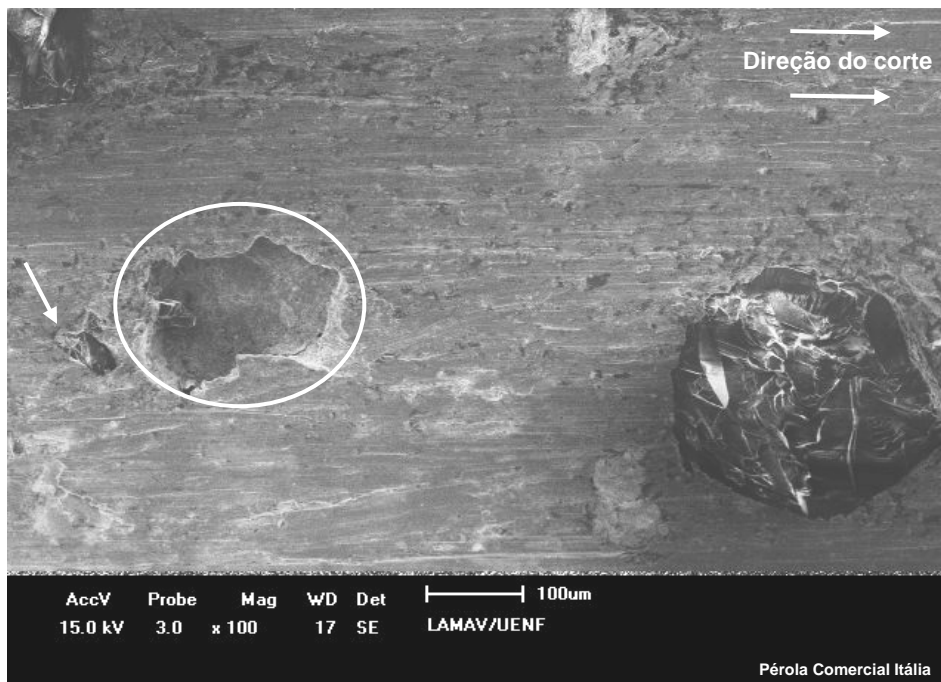


Figura 4.89 – Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

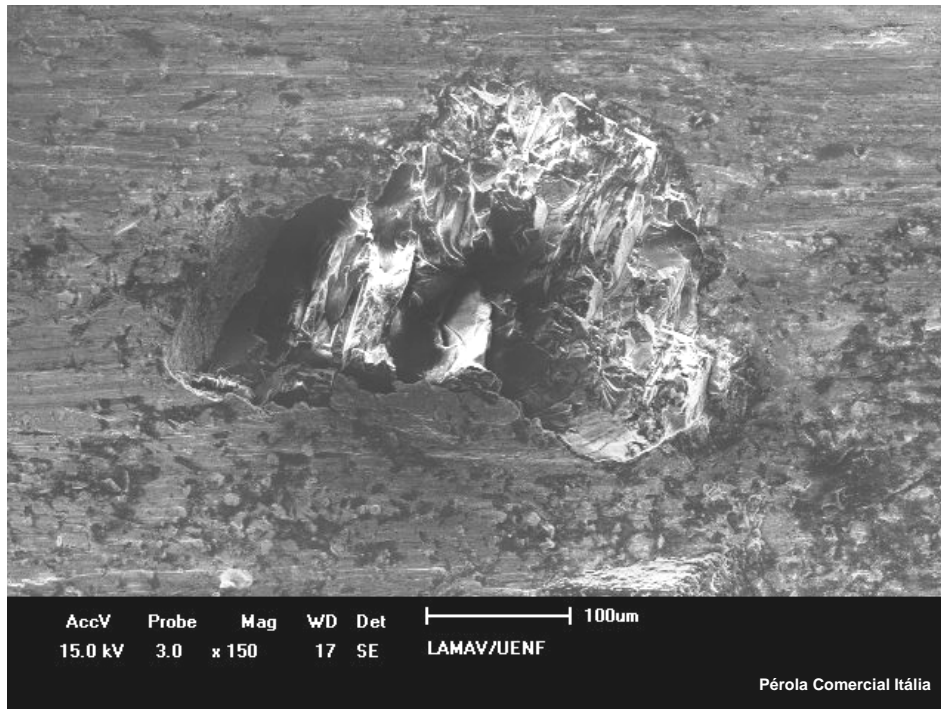


Figura 4.90 – Morfologia do desgaste e estrutura dos diamantes na matriz metálica Co-Fe-W-Cu-Ag (Pérola comercial Itália), após 12 minutos de ensaio de abrasão.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

A presente dissertação relata o estudo do processamento e caracterização de pérolas de fios diamantados por prensagem a quente, a qual é rota industrial de fabricação da metalurgia do pó. Esta tentativa exploratória absorve o conhecimento da tecnologia de produção deste tipo de ferramenta de corte, a qual é de grande importância científica e tecnológica para a indústria do setor de rochas ornamentais no Brasil, nacionalizando as técnicas de processamento de pérolas diamantadas. Sendo assim, destacam-se as seguintes conclusões:

- Conclui-se que foi possível sinterizar o compósito diamantado diretamente no suporte metálico da pérola de fio diamantado, eliminando a etapa industrial de brasagem deste tipo de ferramenta de corte;
- O mecanismo de desgaste da pérola processada com a liga DIABASE-V21, seguiu o padrão clássico do mecanismo de desgaste de uma ferramenta diamantada impregnada, com o desgaste da matriz metálica, clivagem dos diamantes, e surgimento de novos cristais que estavam no “bulk” da ferramenta;
- No ensaio de resistência ao cisalhamento as pérolas diamantadas produzidas por este estudo, com tubos metálicos com canais, suportaram uma carga aproximadamente dez vezes maior que a força aplicada sobre este tipo de ferramenta na operação de corte de rochas ornamentais;
- Os resultados mostram claramente que um nível satisfatório de adesão tubo metálico/compósito diamante foi alcançado, o qual pode ser atribuído, dentre outros fatores, aos canais para aumentar a rugosidade sobre a superfície do tubo metálico;
- O ensaio de resistência ao desgaste da pérola produzida por este estudo com a liga Fe-Cu-Co-Sn mostra que, conseguiu-se com esta pesquisa exploratória, através da rota de prensagem a quente, produzir pérolas diamantadas de boa qualidade, atingindo uma resistência à abrasão da mesma ordem de algumas pérolas comerciais importadas que são normalmente empregadas nas lavras

---

de rochas ornamentais. O ligante usado como matriz metálica DIABASE-V21, é um pó pré-ligado do mercado internacional utilizado para fabricação de ferramentas de corte;

- Este trabalho indica a possibilidade de utilizar esta tecnologia de processamento de pérolas de fios diamantados, a qualquer operação de corte de rochas ornamentais. Desta forma, pode-se utilizar materiais disponíveis no mercado nacional, baseado no sistema Ferro e Cobre.

---

**CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS**

**Abirochas (2011).** Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento do Período Janeiro- Agosto de 2011. <<http://www.abirochas.com.br>>. Acessado em 02/10/2011.

**Abirochas (2012).** Balanço Sucinto das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2011. <<http://www.abirochas.com.br>>. Acessado em 20/01/2012.

**Artini, C.; Muolo, M.L.; Passerone, A. (2011).** Diamond-metal interfaces in cutting tools: areviw. Journal of Materials Science. V.47, n.7, p. 3252-3264.

**ASM Handbook (1973).** Metallography, Structures and Phase Diagra. v.8. 8.ed. p. 293.

**ASM Handbook (1979).** Alloy Phase Diagrams. v.3. 3.ed.

**Asperti, G.; Schotte, D. (1995).** Sawing Reinforced Concrete with Diamond Wire. Diamonds in Industry. ed. De Beers. p. 19-21.

**Barbosa, A.P. (2008).** Estudo da Influência da Composição Fe-Cu-Co Sobre o Comportamento em Ligas Usadas na Fabricação de Ferramentas Diamantadas via Metalurgia do Pó. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes- RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF/LAMAV, 113p.

**Boland, James N.; Li, Xing S. (2010).** Microstructural Characterisation and Wear Behavior of Diamond Composite Materials. Journal Materials, p. 1390-1419.

**Cabral, S.C.; Figueira, M. (2010).** Mecanismo de Desgaste em Matriz Ferrítica com Adição de Diamantes. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, V.2, p.1-8.

**Callister, William D. Jr. (2008).** Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 705p .

**Clark, I.E.; Kamphuis, B. (2002).** Cobalite HDR – A New Prealloyed Matrix Powder for Diamond Construction Tools. *Industrial Diamond Review*. n.3. p.177-182.

**Costa, M.A.S. (2009).** Processos de Demolição de Estruturas. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) –Aveiro- Portugal, Universidade de Aveiro, 137p.

**Daniel , P. (1993).** Slate without Waste. *Quarrying*. IDR, n.4, p. 200-203.

**Davis, P.R., et al. (1996).** An Indicator system for saw grit. *Industrial Diamond Review*, n. 3, p.78-87.

**De Châlus, P.A. (1994).** Metal Powders: for optimum grain retention. *IDR*. n.4, p.170-172.

**Del Villar, M.; Muro, P.; Sánchez, J.M.; Iturriza, I.; Castro, F. (2001).** Consolidation of diamond tools using Cu-Co-Fe based alloys as metallic binders. *Powder Metallurgy*. n.1. v.44. p. 82-90.

**Ferreira, C.R. (2010).** Produção de Coroas por Indução Eletromagnética para Sondagem Geológica em Quartzito. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Ouro Preto – MG, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 132p.

**Filgueira, M.; Pinatti, D.G. (2001).** “Production of diamond wire by Cu-15%vol.Nb in situ Process”, In: *Proc. Of the 15th Int. Plausee Seminar*, Reutte, Austria, Plansee Holding, AG. v. 1, p. 360-374.

**Filgueira, M.; Pinatti, D.G. (2002).** “‘In situ’ diamond wires – Part I: The Cu-15 vol.% Nb high strength cable”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 128, p. 191-195.

**Filgueira, M.; Pinatti, D. G. (2003).** “In Situ” Diamond Wires – Part II: The Bronze 4%weight Diamond Cutting Rope. *Journal of Materials Processing Technology*, v.133. p.132-137.

**German, R.M. (1992).** Principles of Powder Metallurgy. MPIF. New Jersey.

**GE Superabrasives. (1994).** Catálogo. Anexo I do Programa Materiais de Alto Desempenho – Projeto 2 – Tecnologia das Ferramentas Diamantadas, de autoria do Dr. Daltro Garcia Pinatti. Tecnorte/FENORTE (1994).

**Hawkins, A. C. et al. (1990).** The Diamond Wire Saw in Quarrying Granite and Marble. *Dimensional Stone*.

**Jakobuss, M. (2000).** The Dynamics of Diamond Retention in Grinding Wheel Systems. *Proceeding of the Intertech 2000*. July, 17-21. Vancouver/Canada.

**Kamphuis, B.; Serneels, B. (2004).** Cobalt and nickel free bond powder for diamond tools: Cobalite CNF. *Industrial Diamond Review*. n.1. p. 26-32.

**Kittel, C. (2006).** Introdução à Física do Estado Sólido. LTC. 8ed. Rio de Janeiro/RJ, 578p.

**Konstanty, J. (1991).** The Materials Science of Stone Sawing. *Industrial Diamond Review*, n.1. p. 28-31.

**Konstanty, J. (2001).** Diamond Bonding and Matrix Wear Mechanisms Involved in Circular Sawing of Stone. *Industrial Diamond Review*, n.1. p. 55-65.

**Konstanty, J. (2005).** Powder Metallurgy Diamond tools. 1.ed. Powder Metallurgy Dept., University of Mining and Metallurgy, Krakow, Poland. Published by Elsevier Ltd, 102p.

**Lim, S. C.; Ashby, M. F. (1987).** Overview N.55. Wear-Mechanims Maps, *Acta Metall.*, Vol 35 (No.1), p. 1-24.



**Mészáros, M.; Vadasdi, K. (1994).** Process and Equipment for Electrochemical Etching of Diamond – Containing Co-WC Tools and Recovery of Diamond from Used Steel Tools. Hungarian Patent.

**Oliveira, H.C.P (2010).** Influência de Adições de Nióbio no Sistema Ferro-Cobre para Atuar como Matriz ligante em Ferramentas Diamantadas. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) –Campos dos Goytacazes- RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 232p.

**Oliveira, L.J. (2005).** Processamento e Caracterização do Sistema Fe-Cu-Diamante Para Uso em Pérolas de Fios Diamantados. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF, 122p.

**Oliveira, L.J. (2009).** Mecanismos de Desgaste de Compósitos Metal-Diamante Obtido Por Metalurgia do Pó. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) –Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 113p.

**Oliveira, L.J.; Bobrovnitchii, G.S.; Filgueira, M. (2007).** Processing and Characterization of Impregnated Diamond Cutting Tools Using a Ferrous Metal Matrix. International Journal Refractory Metals and Hard Materials, v.25. p.328-335.

**Oliveira, L.J.; Filgueira, M. (2007).** Aplicação de Ligas Fe-Cu-SiC Como Matriz Ligante em Ferramentas Diamantadas. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v.26, n. 1, p.15-20.

**Oliveira, L.J.; Filgueira, M. (2008).** Pérolas Diamantadas Obtidas por Metalurgia do Pó: Nacionalização da Tecnologia. Revista Matéria, v.13, n.1, p.23-32.

**Ozcelik, Y.; Yilmazkaya, E. (2011).** The Effect of the Rock Anisotropy on the Efficiency of Diamond Wire Cutting Machines. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, v48, p. 626-636.

- Peacock, S. R. et al. (2000).** The Future Role of Diamond in the Construction Industry. Proc. of the Intertech, Vancouver/Canada, p. 17-21.
- Przyklenk, K. (1993).** Diamond Impregnated Tools – Uses and Production. Toolmaking. IDR. n.4.
- Regadas, C. M. C., (2006).** Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil. Tese (Mestrado em Geotecnia) –São Carlos- SP, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, 130p.
- Romanski, A.; Lachowski, J.; Konstany, J. (2006).** Diamond Retention Capacity: Evaluation of Stress Field Generated in a Matrix by a Diamond Crystal. Industrial Diamond Review, v.3, p.43-45.
- Sarin, V.; Pal, U.; Gopalan, S. (2003).** Development of Hot Pressing as a Low Cost Processing Technique for Fuel Cell Fabrication. Final Annual Technical Progress Report – Department of Manufacturing Engineering, Boston University. 44p.
- Sebrae (2011).** Setor de Rochas Ornamentais. < [www.sebrae.com.br](http://www.sebrae.com.br)>. Acessado em 02/10/2011.
- Shibuta, D. et al. (1983).** Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap. Mitsubishi Metal Corporation. Japanese Patent.
- Sung, James. C.; Sung, Michael. (2009).** The Brazing of Diamond. Journal of Refractory Metal & Hard Materials, v. 27, p. 382-393.
- Thoreau, B. (1984).** Diamond Impregnated Wire for Sawing Hard Abrasive Stones, IDR. n.2. p. 94-95.
- Tönshoff, H.K.; Friemuth, T.; Hillmann-Apmann, H. (2001).** Diamond Wire Sawing of Steel Components. IDR. n.3. p. 203-208.

**Trancu, T. C. (1980).** Diamond Wire Machine Cuts Marble Quarrying Costs. IDR. p. 329-331.

**Umicore (2012).** Cobalite Pre-alloyed bond powders for Diamond Tools. Engineered Metal Powders - Tool Materials, Belgium. <[www.toolmaterials.com](http://www.toolmaterials.com)>. Acessado em 27/06/2012.

**Urakawa, N. et al.. (2000).** Cutting Performance of Bonded Abrasive Type Diamond Wire Saw. Proc. of the Intertech, 17-21 july. Vancouver/Canada.

**Yamaguchi, K.; Takakura, N.; Imatani, S. (1997).** Compaction and Sintering Characteristics of Composite Metal Powders. Journal Materials Processing Technology, v.63, p. 364 – 369.

**Webb, S.W. (1999).** Diamond retention in sintered cobalt bonds for stone cutting and drilling. Diamond and Related Materials, v.8, p.2043–2052.

**Weber, G.; Weiss, C. (2005).** Diamix – A Family of Bonds Based on Diabase-V21. Industrial Diamond Review, n.2. p. 168-171.

**Weiss, C.; Ade, E. (2008).** Fresh impetus in the market for cobalt alternatives: MasterTec. Industrial Diamond Review, n.2. p. 57-59.

**Weiss, C. (2011).** MasterTec3 – Three is Better Than Two. Diamond Tooling Journal, n.2. p. 30-32.

## APÊNDICE A: EDX DAS PÉROLAS DE FIO DIAMANTADOS COMERCIAIS.

Quantitative Result[Qual-Quant.][AFRICA CERTA]

Group: powder\_air  
Sample: AFRICA CERTA

Layer Info	Analyte	Result	Std. Dev.	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1 Layer1						
1 Layer		6.000 um		----- Fix		
1 Elem.	C10H804	100.000 %		----- Fix		
-----						
B Base						
2 Elem.	Cu	45.669 %	0.155	Quant.-FP	CuKa	227.170
2 Elem.	Fe	35.123 %	0.113	Quant.-FP	FeKa	252.790
2 Elem.	Zn	15.115 %	0.081	Quant.-FP	ZnKa	89.790
2 Elem.	Sn	3.006 %	0.046	Quant.-FP	SnKa	11.236
2 Elem.	Ni	1.088 %	0.025	Quant.-FP	NiKa	5.072

Figura 1- Resultado de análise química via EDX da pérola comercial África do Sul.

Quantitative Result[Qual-Quant.][ITÁLIA]

Group: powder\_air  
Sample: ITÁLIA

Layer Info	Analyte	Result	Std. Dev.	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1 Layer1						
1 Layer		6.000 um		----- Fix		
1 Elem.	C10H804	100.000 %		----- Fix		
-----						
B Base						
2 Elem.	Co	58.030 %	0.148	Quant.-FP	CoKa	259.124
2 Elem.	Fe	21.331 %	0.093	Quant.-FP	FeKa	88.973
2 Elem.	W	11.501 %	0.130	Quant.-FP	W La	13.232
2 Elem.	Cu	4.640 %	0.056	Quant.-FP	CuKa	11.490
2 Elem.	Ag	4.498 %	0.043	Quant.-FP	AgKa	18.630

Figura 2- Resultados de análise química via EDX da pérola comercial Itália.

Quantitative Result[Qual-Quant.][CHINA]

Group: powder\_air  
Sample: CHINA

Layer Info	Analyte	Result	Std. Dev.	Proc.-Calc.	Line	Intensity
1 Layer1						
1 Layer		6.000 um		----- Fix		
1 Elem.	C10H804	100.000 %		----- Fix		
-----						
B Base						
2 Elem.	Fe	72.704 %	0.167	Quant.-FP	FeKa	418.827
2 Elem.	Ni	10.642 %	0.090	Quant.-FP	NiKa	30.755
2 Elem.	Cu	8.105 %	0.071	Quant.-FP	CuKa	28.660
2 Elem.	Zn	4.873 %	0.052	Quant.-FP	ZnKa	19.195
2 Elem.	Sn	3.487 %	0.043	Quant.-FP	SnKa	14.539
2 Elem.	Mn	0.189 %	0.009	Quant.-FP	MnKa	1.002

Figura 3- Resultados de análise química via EDX da pérola comercial China.

**APÊNDICE B: CARACTERÍSTICAS DE ELEMENTOS SELECIONADOS.**

Tabela 1 - Características de elementos selecionados [Callister, 2008].

Elemento	Símbolo	Número Atômico	Peso Atômico (uma)	Densidade do Sólido, 20° C (g/cm <sup>3</sup> )	Estrutura Cristalina, 20°C	Raio Atômico (nm)	Valência mais Comum	Ponto de Fusão (°C)
Cobre	Cu	29	63,55	8,94	CFC	0,128	1+	1085
Cobalto	Co	27	58,93	8,9	HC	0,125	2+	1495
Estanho	Sn	50	118,71	7,27	Tetragonal	0,151	4+	232
Ferro	Fe	26	55,85	7,87	CCC	0,124	2+	1538
Níquel	Ni	28	58,69	8,90	CFC	0,125	2+	1455
Prata	Ag	47	107,87	10,49	CFC	0,144	1+	962
Tungstênio	W	74	183,84	19,3	CCC	0,137	4+	3410
Zinco	Zn	30	65,41	7,13	HC	0,133	2+	420

APÊNDICE C: DIAGRAMA DE FASES

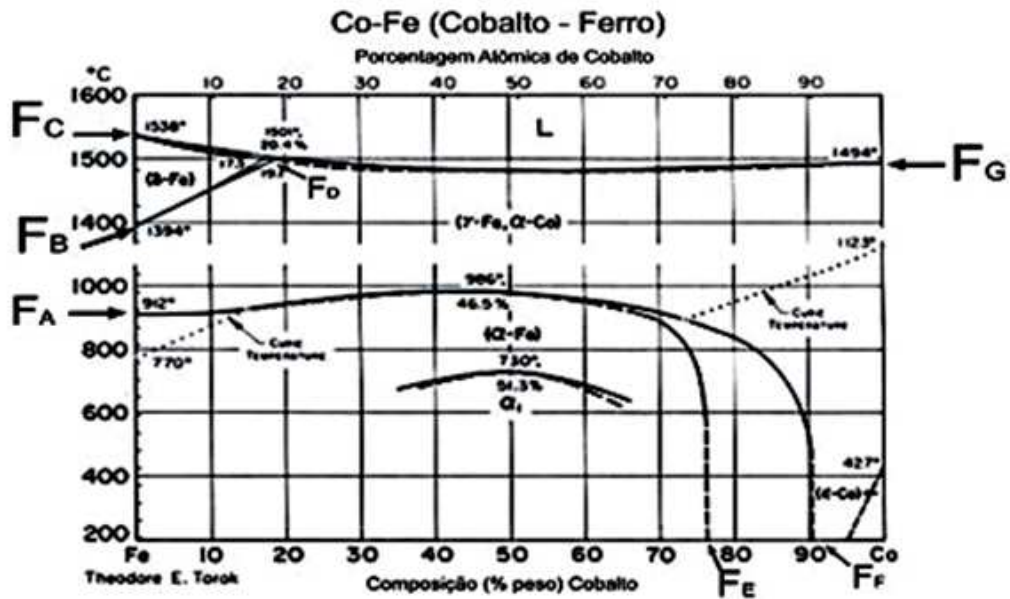


Figura 1– Diagrama de fases Ferro – Cobalto [ASM Handbook,1973].

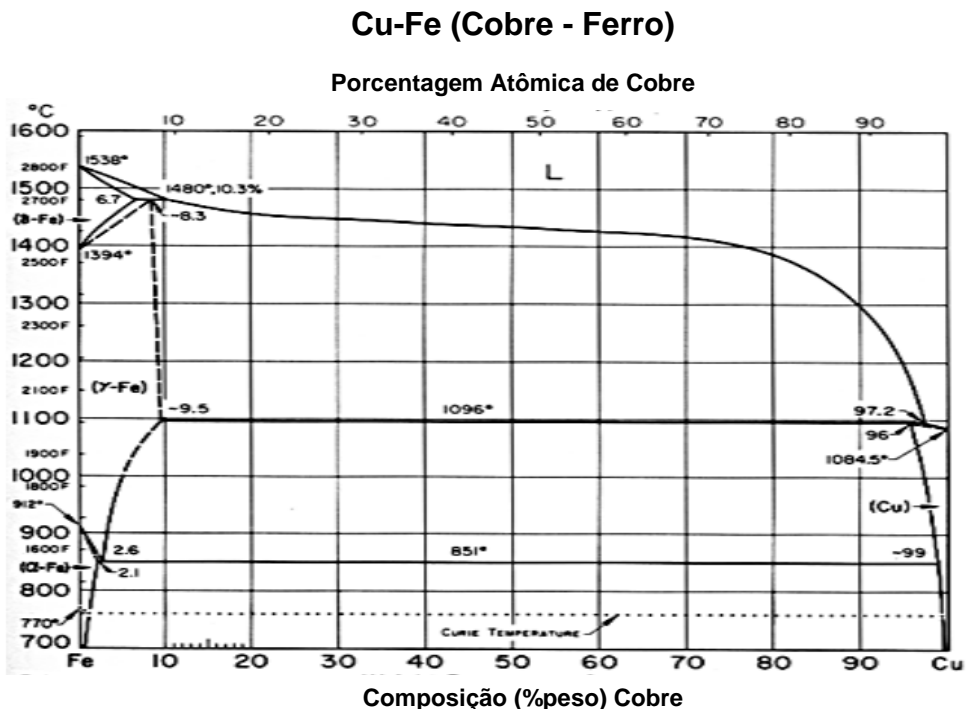


Figura 2- Diagrama de fases Cobre - Ferro [ASM Handbook,1973].

### Cu-Sn (Cobre - Estanho)

Porcentagem Atômica de Estanho

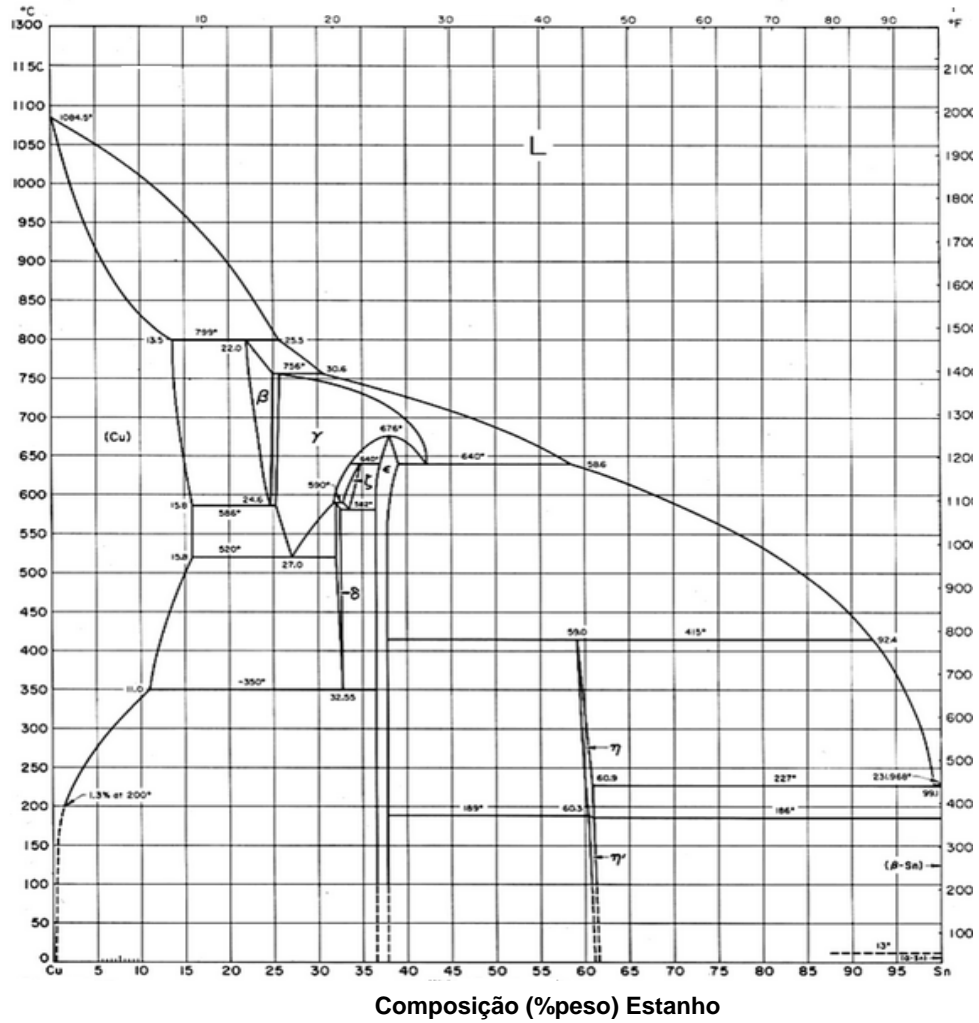


Figura 3 - Diagrama de fases Cobre - Estanho [ASM Handbook,1973].

### Ni-Sn (Níquel – Estanho)

Porcentagem Atômica de Estanho

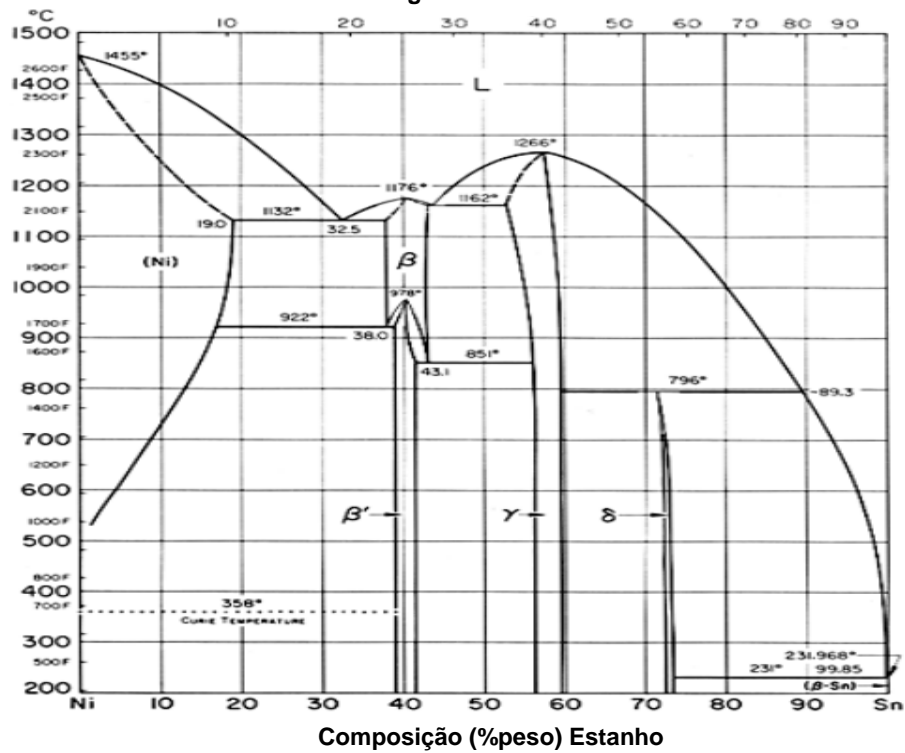


Figura 4 - Diagrama de fases Níquel - Estanho [ASM Handbook,1973].

### Cu-Zn (Cobre – Zinco)

Composição (%atômica Zn)

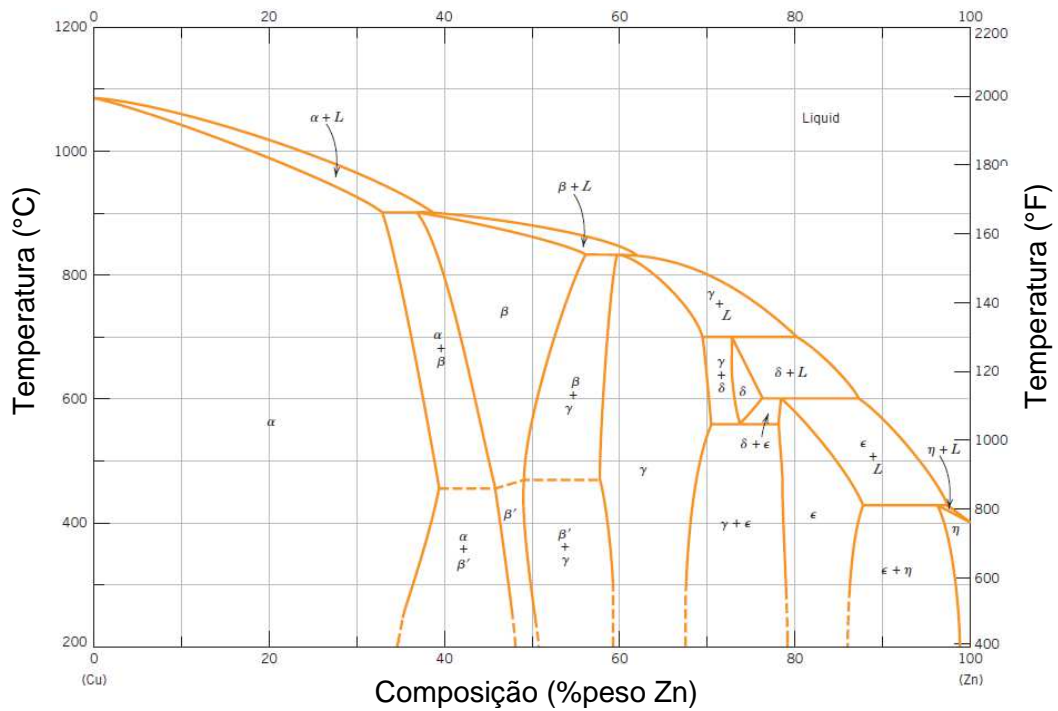
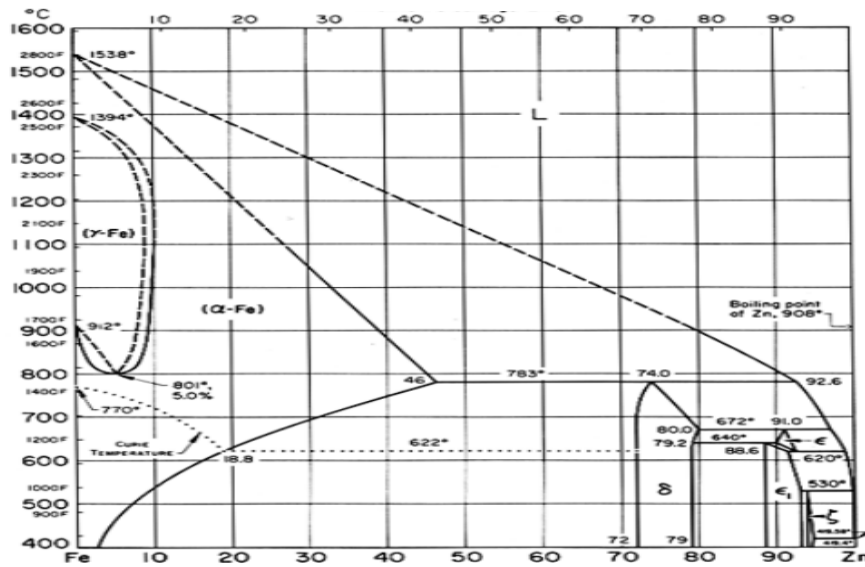


Figura 5 - Diagrama de fases Cobre - Zinco [Callister, 2007].



### Fe-Zn (Ferro – Zinco)

Porcentagem Atômica de Zinco



Composição (% peso) Zinco

Figura 6 - Diagrama de fases Ferro - Zinco [ASM Handbook,1973].

### Co-Cu (Cobalto - Cobre)

Porcentagem Atômica de Cobalto

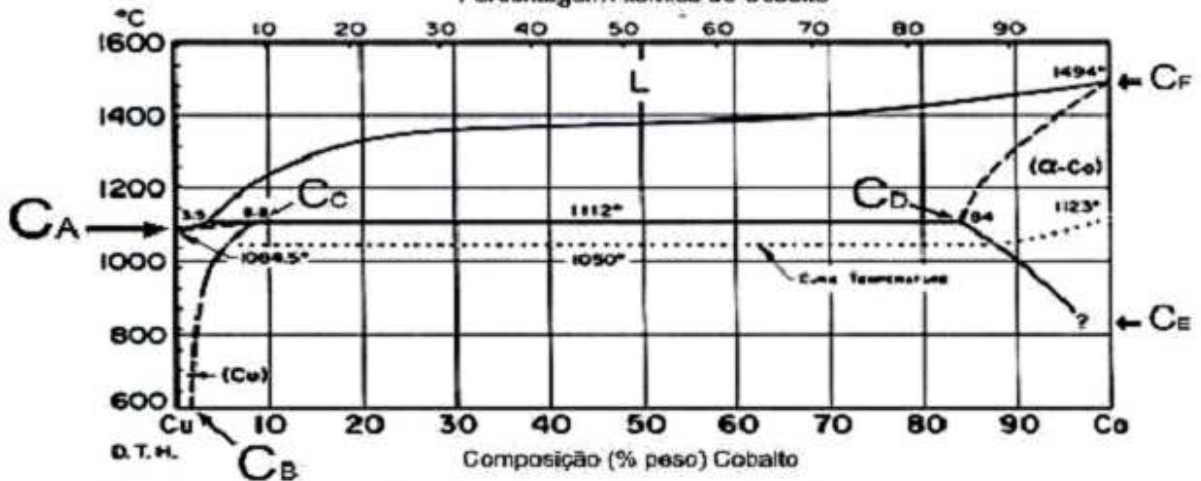


Figura 7 – Diagrama de fases Cobre - Cobalto [ASM Handbook,1973].

**APÊNDICE D: IDENTIFICAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS FASES CRISTALINAS DAS PÉROLAS DE FIO DIAMANTADO ESTUDAS NESTE TRABALHO E FICHAS DE PADRÕES CRIStALOGRAFICOS.**

Tabela 1 – Comparação entre os valores observados no difratograma da liga 61,094%Fe-21,212%Cu-12,564%Co-2,602%Sn-1,888%P-0,640%S (DIABASE-V21) e valores apresentados no JCPDS.

<b>Resultados</b>			<b>Identificação e Análise</b>		
<b>Nº Pico</b>	<b>Intensidade Relativa</b>	<b>2θ (graus)</b>	<b>HKL</b>	<b>Fase</b>	<b>Ficha de Referência</b>
1	33,661	42,259	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(113)	Cu <sub>10</sub> Sn <sub>3</sub> (HC)	26-0564
2	100	44,491	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(110)	CoFe	44-1433
			(110)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816
3	14,250	48,954	(302)	Cu <sub>10</sub> Sn <sub>3</sub> (HC)	26-0564
4	22,440	64,717	(200)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816
			-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(304)	Cu <sub>10</sub> Sn <sub>3</sub> (HC)	26-0564
5	32,350	82,146	(211)	CoFe	44-1433
			(211)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816
6	15,970	98,644	(220)	CoFe	44-1433
			(220)	'Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816

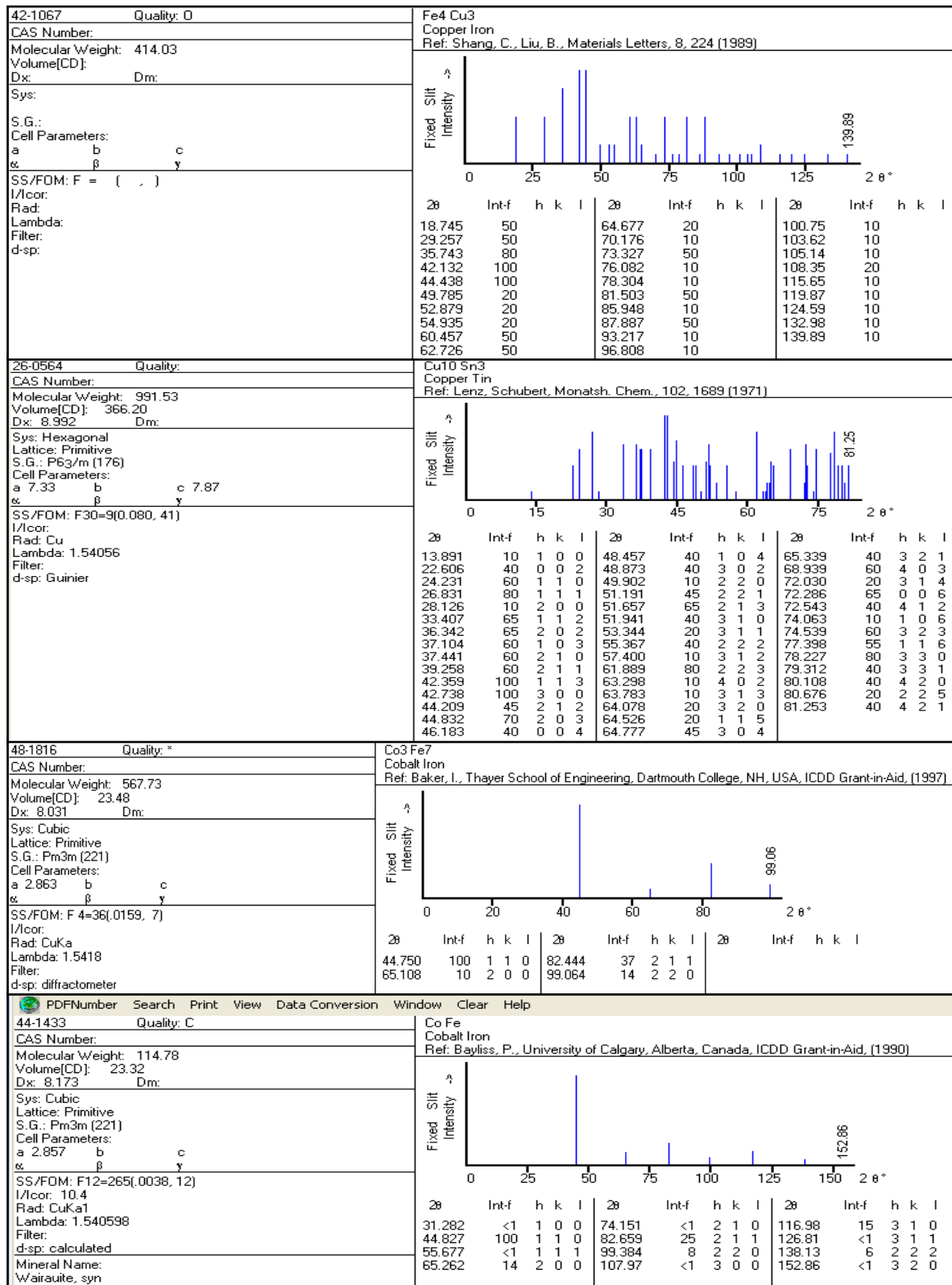


Figura 1- Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola DIABASE V-21.

Tabela 2 – Comparação entre os valores observados no difratograma da pérola comercial China (72,704%Fe-10,642%Ni-8,105%Cu-4,873%Zn-3,487%Sn-0,189%Mn) e valores apresentados no JCPDS.

<b>Resultados</b>			<b>Identificação e Análise</b>		
<b>Nº Pico</b>	<b>Intensidade Relativa</b>	<b>2<math>\theta</math> (graus)</b>	<b>HKL</b>	<b>Fase</b>	<b>Ficha de Referência</b>
1	11,387	42,316	(111)	Cu <sub>0.64</sub> Zn <sub>0.36</sub> (CFC)	50-1333
2	100	44,365	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(111)	FeNi <sub>3</sub>	38-0419
			(110)	NiSn (HC)	03-1004
3	10,530	64,548	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
4	20,291	81,623	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(300)	NiSn (HC)	03-1004
5	10,958	98,361	(220)	NiSn (HC)	03-1004

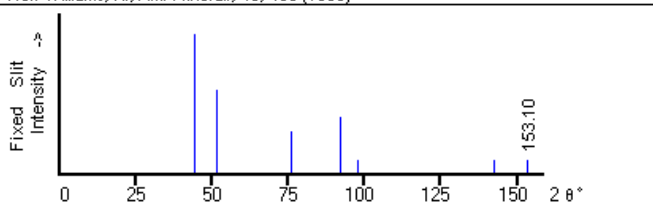
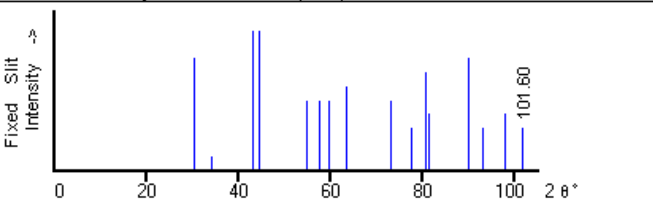
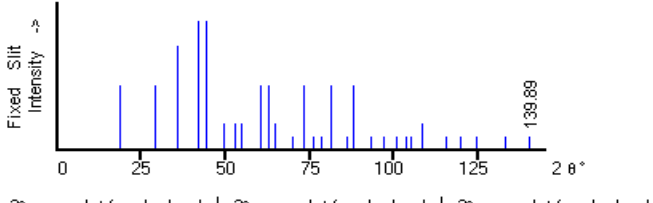
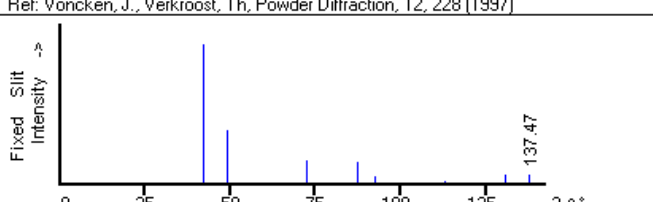
<p>38-0419 Quality:</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 231.95 Volume[CD]: 44.55 Dx: 8.645 Dm:</p> <p>Sys: Cubic Lattice: Primitive S.G.: Pm3m (221) Cell Parameters: a 3.545 b c <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 7=3(0.125, 18) I/Cor: Rad: CuK<math>\alpha</math>1 Lambda: 1.5405 Filter: d-sp: Debye-Scherrer Mineral Name: Awaruite</p>	<p>Fe Ni3 Iron Nickel Ref: Williams, K., Am. Mineral, 45, 450 (1960)</p>  <table border="1" data-bbox="766 436 1422 571"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>44.277</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>92.202</td> <td>40</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>153.10</td> <td>10b</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>51.532</td> <td>60</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>97.695</td> <td>10</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>75.867</td> <td>30</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>142.27</td> <td>10b</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	44.277	100	1	1	1	92.202	40	3	1	1	153.10	10b	4	2	0	51.532	60	2	0	0	97.695	10	2	2	2						75.867	30	2	2	0	142.27	10b	3	3	1																																																																																																														
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
44.277	100	1	1	1	92.202	40	3	1	1	153.10	10b	4	2	0																																																																																																																																																								
51.532	60	2	0	0	97.695	10	2	2	2																																																																																																																																																													
75.867	30	2	2	0	142.27	10b	3	3	1																																																																																																																																																													
<p>03-1004 (Deleted)</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 177.39 Volume[CD]: 75.04 Dx: 7.851 Dm:</p> <p>Sys: Hexagonal Lattice: Primitive S.G.: P63/mmc (194) Cell Parameters: a 4.09 b c 5.18 <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F16=3(0.200, 24) I/Cor: Rad: CuK<math>\alpha</math>1 Lambda: 1.54056 Filter: d-sp:</p>	<p>Ni Sn Nickel Tin Ref: Oftedal, Z. Phys. Chem., 132, 212 (1928)</p>  <table border="1" data-bbox="766 862 1422 1019"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30.591</td> <td>80</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>59.597</td> <td>50</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>89.931</td> <td>80</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>34.330</td> <td>10</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>63.685</td> <td>60</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>93.217</td> <td>30</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>43.253</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>73.327</td> <td>50</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> <td>98.082</td> <td>40</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>44.599</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>77.547</td> <td>30</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>101.59</td> <td>30</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>54.935</td> <td>50</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>80.676</td> <td>70</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>57.557</td> <td>50</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>81.503</td> <td>40</td> <td>3</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	30.591	80	1	0	1	59.597	50	1	0	3	89.931	80	1	1	4	34.330	10	0	0	2	63.685	60	2	0	2	93.217	30	2	1	3	43.253	100	1	0	2	73.327	50	0	0	4	98.082	40	2	2	0	44.599	100	1	1	0	77.547	30	2	0	3	101.59	30	1	0	5	54.935	50	2	0	1	80.676	70	2	1	2						57.557	50	1	1	2	81.503	40	3	0	0																																																																	
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
30.591	80	1	0	1	59.597	50	1	0	3	89.931	80	1	1	4																																																																																																																																																								
34.330	10	0	0	2	63.685	60	2	0	2	93.217	30	2	1	3																																																																																																																																																								
43.253	100	1	0	2	73.327	50	0	0	4	98.082	40	2	2	0																																																																																																																																																								
44.599	100	1	1	0	77.547	30	2	0	3	101.59	30	1	0	5																																																																																																																																																								
54.935	50	2	0	1	80.676	70	2	1	2																																																																																																																																																													
57.557	50	1	1	2	81.503	40	3	0	0																																																																																																																																																													
<p>42-1067 Quality: 0</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 414.03 Volume[CD]: Dx: Dm:</p> <p>Sys: S.G.: Cell Parameters: a b c <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F = ( . )</p> <p>I/Cor: Rad: Lambda: Filter: d-sp:</p>	<p>Fe4 Cu3 Copper Iron Ref: Shang, C., Liu, B., Materials Letters, 8, 224 (1989)</p>  <table border="1" data-bbox="766 1310 1422 1503"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18.745</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>64.677</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>100.75</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>29.257</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>70.176</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>103.62</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>35.743</td> <td>80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>73.327</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>105.14</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>42.132</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>76.082</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>108.35</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>44.438</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>78.304</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>115.65</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>49.785</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>81.503</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>119.87</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>52.879</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>85.948</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>124.59</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>54.935</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>87.887</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>132.98</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>60.457</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>93.217</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>139.89</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>62.726</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>96.808</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	18.745	50				64.677	20				100.75	10				29.257	50				70.176	10				103.62	10				35.743	80				73.327	50				105.14	10				42.132	100				76.082	10				108.35	20				44.438	100				78.304	10				115.65	10				49.785	20				81.503	50				119.87	10				52.879	20				85.948	10				124.59	10				54.935	20				87.887	50				132.98	10				60.457	50				93.217	10				139.89	10				62.726	50				96.808	10								
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
18.745	50				64.677	20				100.75	10																																																																																																																																																											
29.257	50				70.176	10				103.62	10																																																																																																																																																											
35.743	80				73.327	50				105.14	10																																																																																																																																																											
42.132	100				76.082	10				108.35	20																																																																																																																																																											
44.438	100				78.304	10				115.65	10																																																																																																																																																											
49.785	20				81.503	50				119.87	10																																																																																																																																																											
52.879	20				85.948	10				124.59	10																																																																																																																																																											
54.935	20				87.887	50				132.98	10																																																																																																																																																											
60.457	50				93.217	10				139.89	10																																																																																																																																																											
62.726	50				96.808	10																																																																																																																																																																
<p>50-1333 Quality: *</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 64.21 Volume[CD]: 50.49 Dx: 8.446 Dm: 8.430</p> <p>Sys: Cubic Lattice: Face-centered S.G.: Fm3m (225) Cell Parameters: a 3.696 b c <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 8=72(0.138, 8) I/Cor: Rad: CuK<math>\alpha</math>1 Lambda: 1.5406 Filter: Ni d-sp: diffractometer Also called: <math>\alpha</math>-brass</p>	<p>Cu0.64 Zn0.36 Copper Zinc Ref: Voncken, J., Verkroost, Th, Powder Diffraction, 12, 228 (1997)</p>  <table border="1" data-bbox="766 1780 1422 1915"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>42.324</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>87.452</td> <td>15</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>130.54</td> <td>6</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>49.274</td> <td>38</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>92.422</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>137.46</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>72.243</td> <td>17</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>112.96</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	42.324	100	1	1	1	87.452	15	3	1	1	130.54	6	3	3	1	49.274	38	2	0	0	92.422	5	2	2	2	137.46	6	4	2	0	72.243	17	2	2	0	112.96	2	4	0	0																																																																																																														
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
42.324	100	1	1	1	87.452	15	3	1	1	130.54	6	3	3	1																																																																																																																																																								
49.274	38	2	0	0	92.422	5	2	2	2	137.46	6	4	2	0																																																																																																																																																								
72.243	17	2	2	0	112.96	2	4	0	0																																																																																																																																																													

Figura 2 - Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola comercial China.

Tabela 3 – Comparação entre os valores observados no difratograma da pérola comercial África do Sul (45,669%Cu-35,123%Fe-15,115%Zn-3,005%Sn-1,008%Ni) e valores apresentados no *JCPDS*.

<b>Resultados</b>			<b>Identificação e Análise</b>		
<b>Nº Pico</b>	<b>Intensidade Relativa</b>	<b>2<math>\theta</math> (graus)</b>	<b>HKL</b>	<b>Fase</b>	<b>Ficha de Referência</b>
1	18,790	31,324	(411)	NiSn	26-1289
2	30,356	35,426	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(211)	FeSn <sub>2</sub>	73-2030
3	25,413	40,082	(101)	CuZn	08-0349
4	82,947	41,700	(-101)	CuZn	08-0349
			(-312)	FeZn <sub>15</sub>	34-1314
5	100	44,350	(110)	Fe (CFC)	06-0696
			-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			(-110)	CuZn	08-0349
6	48,595	48,110	(421)	FeZn <sub>15</sub>	34-1314
7	33,470	64,664	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
8	40,538	72,230	(020)	CuZn	08-0349
9	30,158	76,847	(-211)	CuZn	08-0349
10	47,409	82,041	(211)	Fe (CFC)	06-0696
			-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
11	45,777	87,112	(-121)	CuZn	08-0349
12	34,854	92,018	?	?	?
13	37,474	98,531	(220)	Fe (CFC)	06-0696

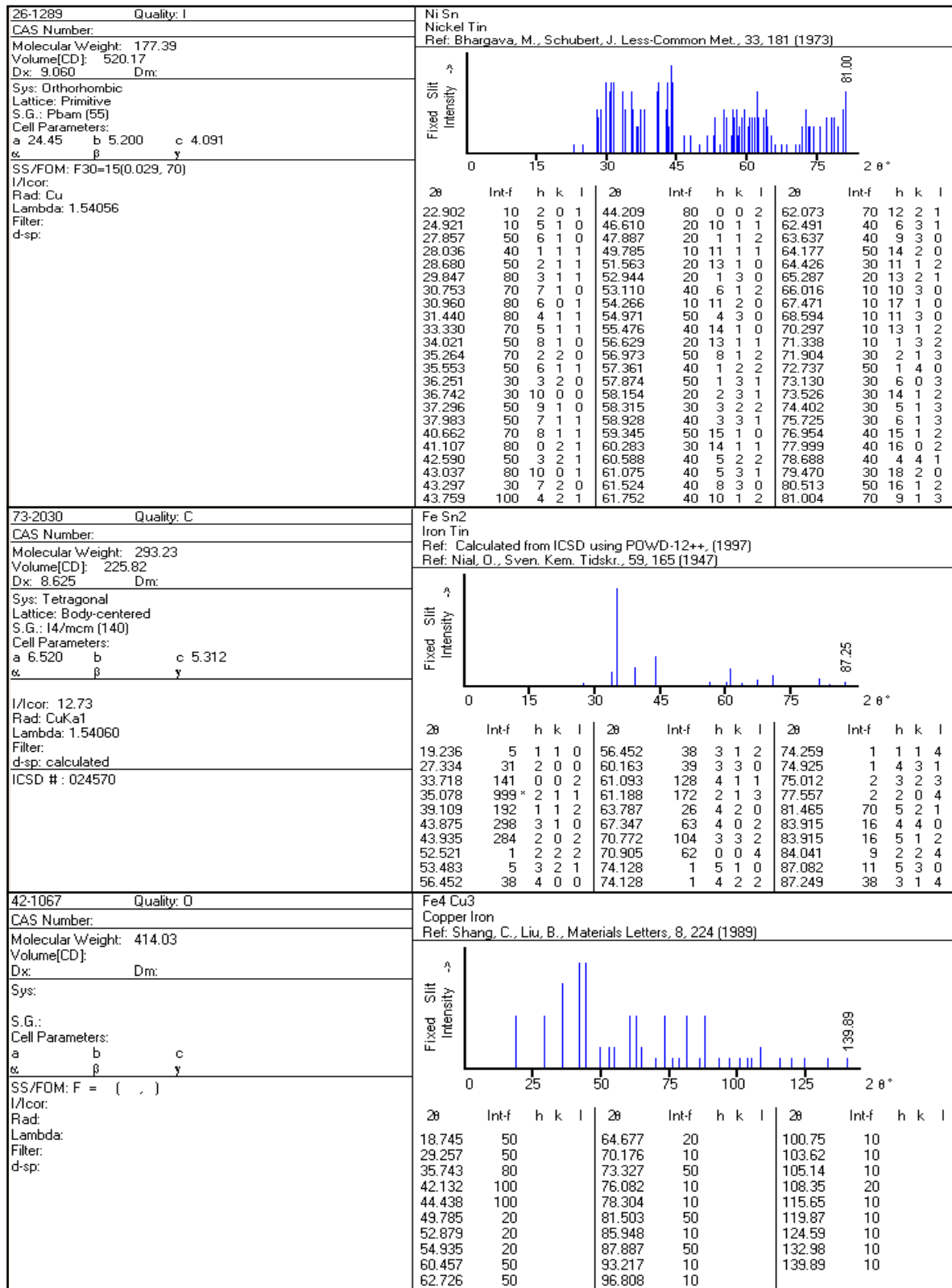


Figura 3 - Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola comercial África do Sul.

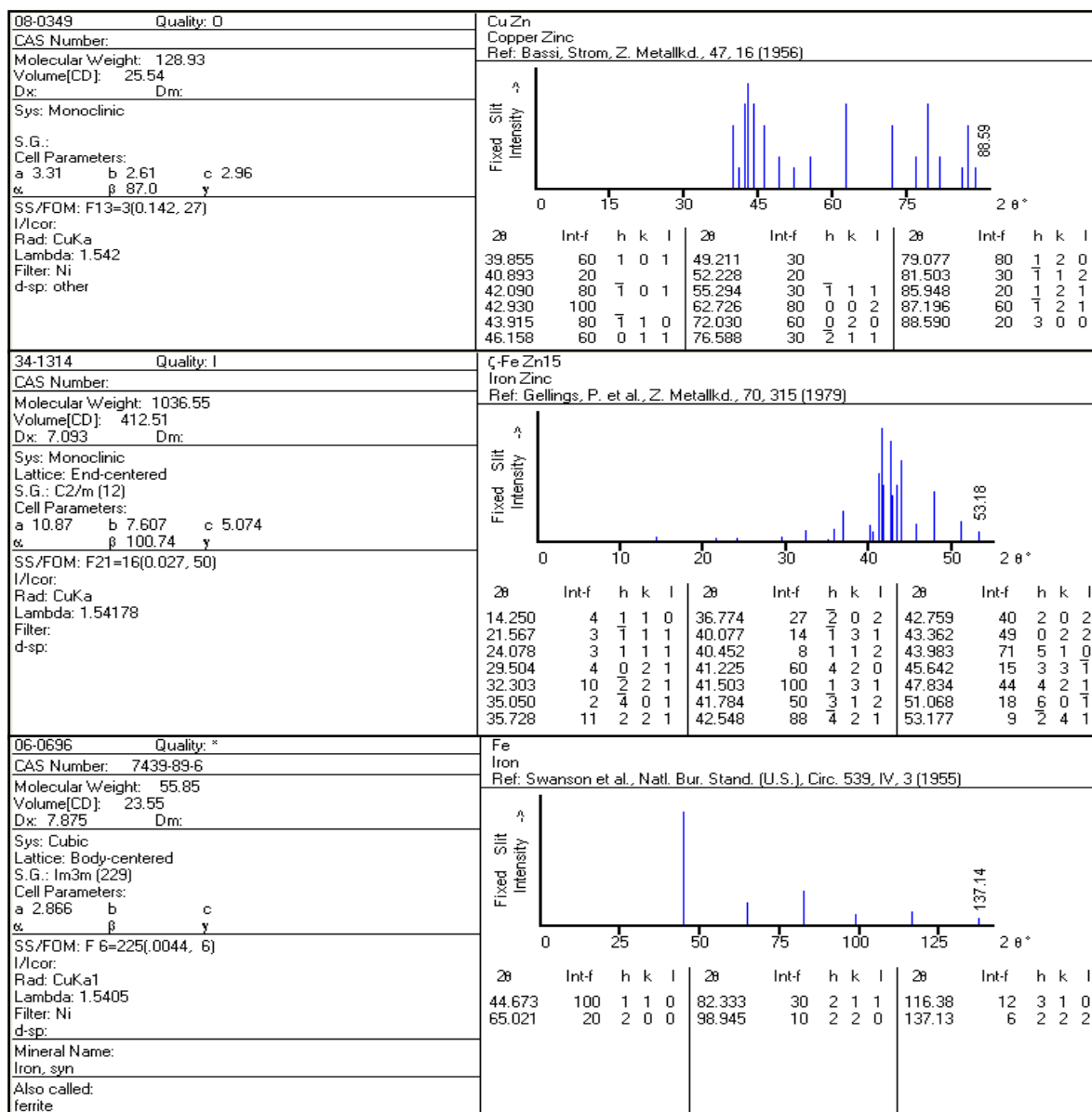


Figura 4 - Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola comercial África do Sul.



Tabela 4 – Comparação entre os valores observados no difratograma da pérola comercial Itália (58,030%Co-21,331%Fe-11,501%W-4,640%Cu-4,498%Ag) e valores apresentados no JCPDS.

<b>Resultados</b>			<b>Identificação e Análise</b>		
<b>Nº Pico</b>	<b>Intensidade Relativa</b>	<b>2θ (graus)</b>	<b>HKL</b>	<b>Fase</b>	<b>Ficha de Referência</b>
1	46,601	31,119	(001)	WC (HC)	25-1047
2	96,679	35,156	(100)	WC (HC)	25-1047
			(311)	CuFe (CFC)	49-1399
3	47,137	37,725	-	Cu <sub>40</sub> Fe <sub>60</sub>	46-1058
4	24,053	39,098	(111)	Ag (CFC)	03-0931
5	20,947	41,001	-	?	?
6	26,356	42,639	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
7	83,075	43,801	(111)	Co <sub>0.52</sub> Cu <sub>0.48</sub> (CFC)	50-1452
			(110)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816
8	48,155	46,608	(331)	CuFe (CFC)	49-1399
9	100	47,712	-	Cu <sub>40</sub> Fe <sub>60</sub>	46-1058
			(101)	WC (HC)	25-1047
10	18,376	49,614	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
11	32,997	63,538	(110)	WC (HC)	25-1047
12	27,374	64,272	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
13	24,535	65,308	(200)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816
			-	Cu <sub>40</sub> Fe <sub>60</sub>	46-1058
14	18,162	67,845	-	?	?
15	17,090	69,337	-	CuFe (CFC)	49-1399
16	36,372	72,853	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
17	33,801	75,058	(200)	WC (HC)	25-1047
			(220)	Co <sub>0.52</sub> Cu <sub>0.48</sub> (CFC)	50-1452

18	36,104	76,696	(102)	WC (HC)	25-1047
19	23,250	81,637	-	Fe <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>	42-1067
			-	Ag (CFC)	03-0931
20	34,852	83,539	(211)	Co <sub>7</sub> Fe <sub>3</sub> (CCC)	50-0795
21	23,785	91,650	-	?	?
22	29,677	98,793	(220)	Co <sub>3</sub> Fe <sub>7</sub>	48-1816

<p>50-1452 Quality:</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 61.15 Volume[CD]: 45.88 Dx: 8.852 Dm:</p> <p>Sys: Cubic Lattice: Face-centered S.G.: Fm<math>\bar{3}</math>m (225) Cell Parameters: a 3.58 b c <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 8=6(0.169, 8) I/lor: Rad: Elec Lambda: Filter: d-sp:</p>	<p>Co<sub>0.52</sub>Cu<sub>0.48</sub> Cobalt Copper Ref: Wu, P et al., Phys. Status Solidi A, 161, 389 (1997)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>43.692</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>90.995</td> <td>100</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>139.89</td> <td>50</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>50.976</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>96.808</td> <td>20</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>154.34</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>74.677</td> <td>100</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>119.87</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	43.692	100	1	1	1	90.995	100	3	1	1	139.89	50	3	3	1	50.976	100	2	0	0	96.808	20	2	2	2	154.34	50				74.677	100	2	2	0	119.87	20																																						
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																													
43.692	100	1	1	1	90.995	100	3	1	1	139.89	50	3	3	1																																																																													
50.976	100	2	0	0	96.808	20	2	2	2	154.34	50																																																																																
74.677	100	2	2	0	119.87	20																																																																																					
<p>50-0795 Quality: I</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 580.07 Volume[CD]: 22.91 Dx: 8.408 Dm:</p> <p>Sys: Cubic Lattice: Body-centered S.G.: Im<math>\bar{3}</math>m (229) Cell Parameters: a 2.840 b c <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 4=35(0.029, 4) I/lor: Rad: CuKa Lambda: 1.5418 Filter: d-sp: diffractometer</p>	<p>Co<sub>7</sub>Fe<sub>3</sub> Cobalt Iron Ref: Baker, I., Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1997)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>45.169</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>83.252</td> <td>33</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>100.15</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>65.712</td> <td>9</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100.15</td> <td>8</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	45.169	100	1	1	0	83.252	33	2	1	1	100.15					65.712	9	2	0	0	100.15	8	2	2	0																																																		
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																													
45.169	100	1	1	0	83.252	33	2	1	1	100.15																																																																																	
65.712	9	2	0	0	100.15	8	2	2	0																																																																																		
<p>25-1047 Quality: *</p> <p>CAS Number: 12070-12-1</p> <p>Molecular Weight: 195.86 Volume[CD]: 20.76 Dx: 15.669 Dm:</p> <p>Sys: Hexagonal Lattice: Primitive S.G.: P<math>\bar{6}</math>m2 (187) Cell Parameters: a 2.906 b c 2.837 <math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F14=29(0.035, 14) I/lor: Rad: CuKa1 Lambda: 1.54056 Filter: d-sp: Mineral Name: Unnamed mineral, syn [NR]</p>	<p>W C Tungsten Carbide Ref: Bind, McCarthy, G., Penn State Univ, University Park, PA, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1973)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2<math>\theta</math></th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31.474</td> <td>45</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>73.064</td> <td>25</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>108.18</td> <td>10</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>35.626</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>75.442</td> <td>14</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>109.02</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>48.266</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>77.101</td> <td>30</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>109.71</td> <td>10</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>63.979</td> <td>20</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>84.015</td> <td>20</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>117.29</td> <td>20</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>65.701</td> <td>6</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>98.734</td> <td>14</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	31.474	45	0	0	1	73.064	25	1	1	1	108.18	10	2	1	0	35.626	100	1	0	0	75.442	14	2	0	0	109.02	1	0	0	3	48.266	100	1	0	1	77.101	30	1	0	2	109.71	10	2	0	2	63.979	20	1	1	0	84.015	20	2	0	1	117.29	20	2	1	1	65.701	6	0	0	2	98.734	14	1	1	2					
2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l	2 $\theta$	Int-f	h	k	l																																																																													
31.474	45	0	0	1	73.064	25	1	1	1	108.18	10	2	1	0																																																																													
35.626	100	1	0	0	75.442	14	2	0	0	109.02	1	0	0	3																																																																													
48.266	100	1	0	1	77.101	30	1	0	2	109.71	10	2	0	2																																																																													
63.979	20	1	1	0	84.015	20	2	0	1	117.29	20	2	1	1																																																																													
65.701	6	0	0	2	98.734	14	1	1	2																																																																																		

Figura 5 - Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola comercial Itália.

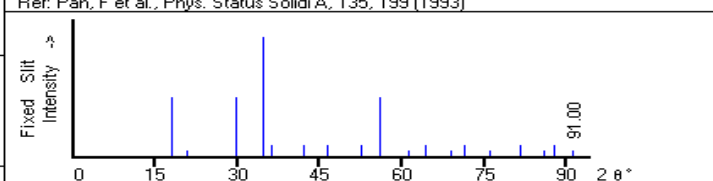
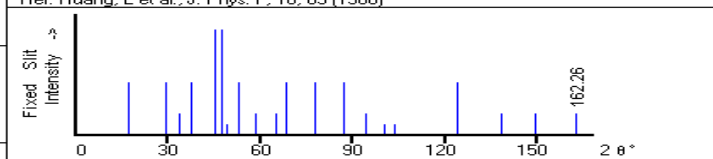

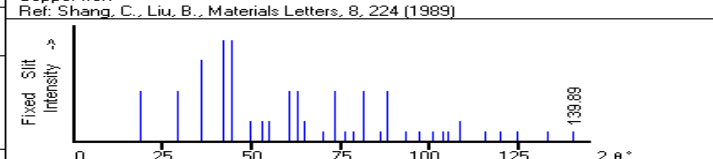
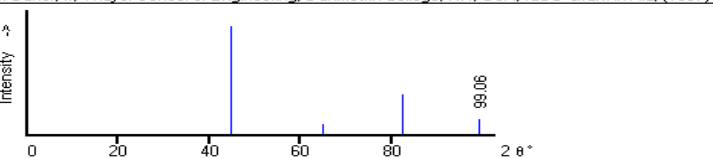
<p>49-1399 Quality: D</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 60.62</p> <p>Volume[CD]: 622.84</p> <p>Dx: 8.404 Dm:</p> <p>Sys: Cubic</p> <p>Lattice: Face-centered</p> <p>S.G.: Fm3m (225)</p> <p>Cell Parameters:</p> <p>a 8.54 b c</p> <p><math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F13=5(0.116, 21)</p> <p>I/ICor:</p> <p>Rad: Elec</p> <p>Lambda:</p> <p>Filter:</p> <p>d-sp:</p>	<p>Cu<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub></p> <p>Copper Iron</p> <p>Ref: Pan, F et al., Phys. Status Solidi A, 135, 199 (1993)</p>  <table border="1" data-bbox="686 403 1402 555"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17.941</td> <td>50</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>46.283</td> <td>10</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>71.401</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>20.785</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>52.551</td> <td>10</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>76.082</td> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>29.655</td> <td>50</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>56.027</td> <td>50</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>81.503*</td> <td>10</td> <td>6</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>34.742</td> <td>100</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>61.344</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>85.948</td> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>36.342</td> <td>10</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>64.177*</td> <td>10</td> <td>5</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>87.887</td> <td>10</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>42.194</td> <td>10</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>68.997</td> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>90.995</td> <td>5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	17.941	50	1	1	1	46.283	10	3	3	1	71.401	10				20.785	5	2	0	0	52.551	10	4	2	2	76.082	5				29.655	50	2	2	0	56.027	50	3	3	3	81.503*	10	6	4	0	34.742	100	3	1	1	61.344	5	4	4	0	85.948	5				36.342	10	2	2	2	64.177*	10	5	3	1	87.887	10	5	5	3	42.194	10	4	0	0	68.997	5				90.995	5																																																															
2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
17.941	50	1	1	1	46.283	10	3	3	1	71.401	10																																																																																																																																																											
20.785	5	2	0	0	52.551	10	4	2	2	76.082	5																																																																																																																																																											
29.655	50	2	2	0	56.027	50	3	3	3	81.503*	10	6	4	0																																																																																																																																																								
34.742	100	3	1	1	61.344	5	4	4	0	85.948	5																																																																																																																																																											
36.342	10	2	2	2	64.177*	10	5	3	1	87.887	10	5	5	3																																																																																																																																																								
42.194	10	4	0	0	68.997	5				90.995	5																																																																																																																																																											
<p>46-1058 Quality: D</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 5892.66</p> <p>Volume[CD]:</p> <p>Dx: Dm:</p> <p>Sys:</p> <p>S.G.:</p> <p>Cell Parameters:</p> <p>a b c</p> <p><math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F = ( , )</p> <p>I/ICor:</p> <p>Rad: Elec</p> <p>Lambda:</p> <p>Filter:</p> <p>d-sp:</p>	<p>Cu<sub>40</sub>Fe<sub>60</sub></p> <p>Copper Iron</p> <p>Ref: Huang, L et al., J. Phys. F, 18, 69 (1988)</p>  <table border="1" data-bbox="686 761 1402 913"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17.203</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>52.849</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>100.24</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>29.256</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>58.730</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>103.59</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>33.634</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>65.287</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>124.22</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>37.620</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>68.315</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>138.57</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>45.129</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>77.577</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>149.49</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>47.420</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>87.099</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>162.26</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>49.115</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>94.296</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	17.203	50				52.849	50				100.24	10				29.256	50				58.730	20				103.59	10				33.634	20				65.287	20				124.22	50				37.620	50				68.315	50				138.57	20				45.129	100				77.577	50				149.49	20				47.420	100				87.099	50				162.26	20				49.115	10				94.296	20																																																					
2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
17.203	50				52.849	50				100.24	10																																																																																																																																																											
29.256	50				58.730	20				103.59	10																																																																																																																																																											
33.634	20				65.287	20				124.22	50																																																																																																																																																											
37.620	50				68.315	50				138.57	20																																																																																																																																																											
45.129	100				77.577	50				149.49	20																																																																																																																																																											
47.420	100				87.099	50				162.26	20																																																																																																																																																											
49.115	10				94.296	20																																																																																																																																																																
<p>03-0931 (Deleted)</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 107.87</p> <p>Volume[CD]: 67.27</p> <p>Dx: 10.651 Dm: 10.500</p> <p>Sys: Cubic</p> <p>Lattice: Face-centered</p> <p>S.G.: Fm3m (225)</p> <p>Cell Parameters:</p> <p>a 4.067 b c</p> <p><math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 4=3(0.360, 4)</p> <p>I/ICor:</p> <p>Rad: CuK<math>\alpha</math>1</p> <p>Lambda: 1.5405</p> <p>Filter:</p> <p>d-sp:</p>	<p>Ag</p> <p>Silver</p> <p>Ref: Jung, Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., 64, 423 (1926)</p>  <table border="1" data-bbox="686 1120 1402 1243"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>38.783</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>64.677</td> <td>80</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>81.503</td> <td>60</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>44.141</td> <td>90</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>78.304</td> <td>80</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	38.783	100	1	1	1	64.677	80	2	2	0	81.503	60				44.141	90	2	0	0	78.304	80	3	1	1																																																																																																																													
2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
38.783	100	1	1	1	64.677	80	2	2	0	81.503	60																																																																																																																																																											
44.141	90	2	0	0	78.304	80	3	1	1																																																																																																																																																													
<p>42-1067 Quality: D</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 414.03</p> <p>Volume[CD]:</p> <p>Dx: Dm:</p> <p>Sys:</p> <p>S.G.:</p> <p>Cell Parameters:</p> <p>a b c</p> <p><math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F = ( , )</p> <p>I/ICor:</p> <p>Rad:</p> <p>Lambda:</p> <p>Filter:</p> <p>d-sp:</p>	<p>Fe<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub></p> <p>Copper Iron</p> <p>Ref: Shang, C., Liu, B., Materials Letters, 8, 224 (1989)</p>  <table border="1" data-bbox="686 1433 1402 1630"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>18.745</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>64.677</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>100.75</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>29.257</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>70.176</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>103.62</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>35.743</td> <td>80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>73.327</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>105.14</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>42.132</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>76.082</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>108.35</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>44.438</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>78.304</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>115.65</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>49.785</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>81.503</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>119.87</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>52.879</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>85.948</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>124.59</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>54.935</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>87.887</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>132.98</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>60.457</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>93.217</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>139.89</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>62.726</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>96.808</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	18.745	50				64.677	20				100.75	10				29.257	50				70.176	10				103.62	10				35.743	80				73.327	50				105.14	10				42.132	100				76.082	10				108.35	20				44.438	100				78.304	10				115.65	10				49.785	20				81.503	50				119.87	10				52.879	20				85.948	10				124.59	10				54.935	20				87.887	50				132.98	10				60.457	50				93.217	10				139.89	10				62.726	50				96.808	10								
2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
18.745	50				64.677	20				100.75	10																																																																																																																																																											
29.257	50				70.176	10				103.62	10																																																																																																																																																											
35.743	80				73.327	50				105.14	10																																																																																																																																																											
42.132	100				76.082	10				108.35	20																																																																																																																																																											
44.438	100				78.304	10				115.65	10																																																																																																																																																											
49.785	20				81.503	50				119.87	10																																																																																																																																																											
52.879	20				85.948	10				124.59	10																																																																																																																																																											
54.935	20				87.887	50				132.98	10																																																																																																																																																											
60.457	50				93.217	10				139.89	10																																																																																																																																																											
62.726	50				96.808	10																																																																																																																																																																
<p>48-1816 Quality: *</p> <p>CAS Number:</p> <p>Molecular Weight: 567.73</p> <p>Volume[CD]: 23.48</p> <p>Dx: 8.031 Dm:</p> <p>Sys: Cubic</p> <p>Lattice: Primitive</p> <p>S.G.: Pm3m (221)</p> <p>Cell Parameters:</p> <p>a 2.863 b c</p> <p><math>\alpha</math> <math>\beta</math> <math>\gamma</math></p> <p>SS/FOM: F 4=36(0.159, 7)</p> <p>I/ICor:</p> <p>Rad: CuK<math>\alpha</math></p> <p>Lambda: 1.5418</p> <p>Filter:</p> <p>d-sp: diffractometer</p>	<p>Co<sub>3</sub>Fe<sub>7</sub></p> <p>Cobalt Iron</p> <p>Ref: Baker, L., Thayer School of Engineering, Dartmouth College, NH, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1997)</p>  <table border="1" data-bbox="686 1836 1402 1926"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> <th>2θ</th> <th>Int-f</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>44.750</td> <td>100</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>82.444</td> <td>37</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>99.06</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>65.108</td> <td>10</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>99.064</td> <td>14</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	44.750	100	1	1	0	82.444	37	2	1	1	99.06					65.108	10	2	0	0	99.064	14	2	2	0																																																																																																																													
2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l	2θ	Int-f	h	k	l																																																																																																																																																								
44.750	100	1	1	0	82.444	37	2	1	1	99.06																																																																																																																																																												
65.108	10	2	0	0	99.064	14	2	2	0																																																																																																																																																													

Figura 6 - Fichas de padrões cristalográficos utilizadas nas análises de Raio-X da pérola comercial Itália.

## APÊNDICE E: QUANTIFICAÇÃO QUÍMICA DOS COMPÓSITOS DIAMANTADOS USANDO A MICROANÁLISE.

Tabela 1: Análise química quantitativa do compósito diamantado 61,094%Fe-21,212%Cu-12,564%Co-2,602%Sn-1,888%P-0,640%S (DIABASE-V21), referente à microanálise de modo pontual.

### Ponto 1:

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	97.191	100.000	100.000	0.47583	1.00000	1.00000	1.00000
Total		100.000	100.000	0.47583			

### Ponto 2:

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	3.569	3.383	12.224	0.01748	0.90751	3.75691	1.00000
O	8.888	8.154	22.117	0.07234	0.91318	2.17369	1.00000
Si	3.756	1.118	1.727	0.01249	0.92733	1.70385	0.99764
Ca	1.418	0.604	0.654	0.01117	0.93696	1.05823	0.95995
Fe	37.091	56.451	43.865	0.99309	1.02397	1.00493	0.97275
Cu	25.306	26.279	17.946	0.16196	1.02974	2.77473	1.00000
Sn	3.613	4.011	1.467	0.06328	1.15292	0.99642	0.97165
Total		100.000	100.000	1.33181			

### Ponto 3:

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	2.416	2.330	8.510	0.01294	0.90709	3.76928	1.00000
O	11.007	9.051	24.820	0.08958	0.91271	2.10228	1.00000
Si	4.968	1.380	2.156	0.01667	0.92673	1.70148	0.99762
Fe	41.701	58.937	46.300	1.11651	1.02312	1.00460	0.97532
Cu	6.641	24.170	16.687	0.41409	1.06065	1.03216	1.01256
Sn	4.036	4.132	1.527	0.07044	1.15206	0.99651	0.97033
Total		100.000	100.000	1.72023			

### Ponto 4:

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	1.840	1.939	6.922	0.00986	0.90941	3.78467	1.00000
O	12.374	9.514	25.494	0.10071	0.91552	1.80531	1.00000
Si	4.654	1.393	2.126	0.01561	0.93090	1.68186	0.99707
Fe	46.085	71.592	54.959	1.23391	1.03088	0.99989	0.98480
Cu	3.937	15.562	10.499	0.24156	1.06987	1.03732	1.01563
Total		100.000	100.000	1.60165			

Tabela 2: Análise química quantitativa do compósito diamantado 72,704%Fe-10,642%Ni-8,105%Cu-4,873%Zn-3,487%Sn-0,189%Mn (Perola comercial China), referente à microanálise de modo pontual.

**Ponto 1:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	587.692	81.348	85.433	2.87724	0.99575	1.19418	1.00000
O	13.816	17.784	14.021	0.12911	1.01933	5.68324	1.00000
F	2.224	0.663	0.440	0.00613	1.08760	4.18292	1.00000
Mg	2.078	0.205	0.106	0.00579	1.07448	1.38367	1.00031
Total		100.000	100.000	3.01827			

**Ponto 2:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	3.497	2.070	6.301	0.01874	0.91928	3.53160	1.00000
N	3.348	9.844	25.698	0.13686	0.92324	2.29003	1.00000
O	9.209	7.661	17.509	0.10064	0.92669	2.41453	1.00000
Fe	64.574	60.623	39.691	1.72001	1.05346	1.00183	0.98162
Ni	4.649	7.732	4.816	0.20909	1.04038	1.04297	1.00168
Zn	2.762	9.023	5.046	0.23185	1.09746	1.02721	1.01471
Sn	4.583	3.047	0.939	0.07967	1.18055	0.98601	0.96585
Total		100.000	100.000	2.49686			

**Ponto 3:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	4.705	3.053	10.366	0.02381	0.91315	3.65385	1.00000
O	19.301	9.388	23.928	0.13913	0.91966	1.90924	1.00000
Na	8.007	2.982	5.289	0.02182	0.96915	3.67140	0.99941
Si	3.201	0.636	0.924	0.01064	0.93616	1.66675	0.99707
Fe	64.066	67.078	48.980	1.70648	1.03876	1.00152	0.98323
Ni	3.737	6.994	4.859	0.16731	1.02517	1.04748	1.01303
Cu	2.747	7.295	4.681	0.16761	1.07860	1.03551	1.01401
Ag	4.426	2.574	0.973	0.06006	1.11574	1.01979	0.98000
Total		100.000	100.000	2.29686			

**Ponto 4:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-Value	Z	A	F
C	3.677	2.181	8.316	0.01800	0.90764	3.88035	1.00000
O	14.821	9.500	27.192	0.12063	0.91240	2.50881	1.00000
Fe	45.155	40.545	33.246	1.19660	1.01465	1.01160	0.95944
Ni	5.936	9.394	7.328	0.26949	0.99911	1.03347	0.98124
Cu	5.046	11.538	8.314	0.31126	1.04986	1.02481	1.00136
Zn	5.357	16.684	11.685	0.44729	1.05046	1.02253	1.00928
Sn	14.979	10.158	3.919	0.26143	1.14598	1.00307	0.98244
Total		100.000	100.000	2.62470			

Tabela 3: Análise química quantitativa do compósito diamantado 45,669%Cu-35,123%Fe-15,115%Zn-3,005%Sn-1,008%Ni (Perola comercial África do Sul), referente à microanálise de modo pontual.

**Ponto 1:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	6.953	5.856	18.505	0.03404	0.91449	3.86049	1.00000
O	14.690	10.586	25.117	0.11956	0.92163	1.97165	1.00000
Si	9.122	2.383	3.221	0.03122	0.93984	1.67031	0.99771
Fe	42.726	56.691	38.532	1.14397	1.04607	0.99995	0.97223
Cu	26.400	24.484	14.625	0.17552	1.04102	2.75000	1.00000
Total		100.000	100.000	1.50431			

**Ponto 2:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	5.270	4.362	12.566	0.02580	0.92018	4.28484	1.00000
O	30.155	17.714	38.315	0.21737	0.92842	2.04707	1.00000
Al	5.332	1.394	1.788	0.01624	0.97974	2.04792	0.99822
Si	17.314	3.965	4.886	0.05808	0.94965	1.67920	0.99852
K	3.003	0.970	0.859	0.02141	0.98851	1.09250	0.97853
Fe	31.775	36.805	22.806	0.84637	1.06295	1.00124	0.95292
Cu	8.039	23.938	13.036	0.49322	1.10646	1.01836	1.00453
Zn	2.648	10.852	5.744	0.22350	1.10956	1.01288	1.00763
Total		100.000	100.000	1.90199			

**Ponto 3:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	77.626	90.004	97.667	0.38004	0.99138	1.26821	1.00
Fe	1.627	9.996	2.333	0.04378	1.28570	0.98610	0.95
Total		100.000	100.000	0.42382			

**Ponto 4:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	4.214	2.981	10.536	0.02133	0.90995	3.55234	1.00000
O	13.181	8.638	22.924	0.12317	0.91613	1.77077	1.00000
Fe	68.946	81.310	61.815	1.83646	1.03220	0.99904	0.99314
Cu	2.360	7.071	4.725	0.14400	1.07139	1.04247	1.01702
Total		100.000	100.000	2.12496			

Tabela 4: Análise química quantitativa do compósito diamantado 58,030%Co-21,331%Fe-11,501%W-4,640%Cu-4,498%Ag (Perola comercial Itália), referente à microanálise de modo pontual.

**Ponto 1:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	180.547	74.029	88.062	0.88393	0.98282	1.55505	1.00000
O	4.376	8.307	7.419	0.03154	1.00362	4.78854	1.00000
Fe	6.466	17.664	4.519	0.13872	1.12074	2.07336	1.00000
Total		100.000	100.000	1.05419			

**Ponto 2:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	173.129	81.916	87.036	0.84761	0.99463	1.21813	1.00000
O	4.157	15.518	12.378	0.03383	1.01790	5.64909	1.00000
Fe	1.051	2.566	0.586	0.02786	1.29855	0.98545	0.90241
Total		100.000	100.000	0.90930			

**Ponto 3:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	7.261	4.712	15.007	0.03555	0.91267	3.54544	1.00000
N	1.653	3.693	10.086	0.03908	0.91636	2.51771	1.00000
O	13.697	8.072	19.300	0.09873	0.91955	2.17050	1.00000
Si	9.980	2.136	2.910	0.03416	0.93701	1.63433	0.99698
Fe	44.423	49.905	34.181	1.18326	1.04118	1.00242	0.98646
Co	16.998	26.113	16.949	0.60324	1.06368	1.00033	0.99314
Ag	4.624	2.893	1.026	0.06308	1.11743	1.02235	0.97990
Lu	0.409	2.476	0.541	0.04366	1.37448	1.00704	1.00000
Total		100.000	100.000	2.10076			

**Ponto 4:**

Element	Intensity	weight%	AT%	K-value	Z	A	F
C	18.561	2.317	4.048	0.09394	0.95726	5.86058	1.00000
O	732.527	48.814	64.024	5.28036	0.97350	2.15984	1.00000
Na	58.342	1.571	1.434	0.16029	1.03976	2.15692	0.99423
Mg	25.402	0.533	0.460	0.07185	1.01424	1.67984	0.99017
Al	309.890	6.028	4.688	0.94360	1.04597	1.40766	0.98680
Si	1330.948	26.008	19.431	4.46476	1.01733	1.30314	0.99938
K	94.044	3.413	1.831	0.67048	1.07681	1.07943	0.99594
Fe	20.636	2.799	1.052	0.54684	1.18793	1.00057	0.97956
Co	45.103	8.517	3.032	1.61663	1.21966	0.99877	0.98361
Total		100.000	100.000	13.84875			