

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS
AUTOSSOLDANTES NO SISTEMA Fe-Cu-Co-P PARA FABRICAÇÃO
DE FIO DIAMANTADO**

CRISTIANE DE JESUS AGUIAR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2016**

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS
AUTOSSOLDANTES NO SISTEMA Fe-Cu-Co-P PARA FABRICAÇÃO
DE FIO DIAMANTADO

CRISTIANE DE JESUS AGUIAR

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias da Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Doutora
em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof^a. D. Sc. Ana Lucia Diegues Skury

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JULHO – 2016

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PÉROLAS
AUTOSSOLDANTES NO SISTEMA Fe-Cu-Co-P PARA FABRICAÇÃO
DE FIO DIAMANTADO

CRISTIANE DE JESUS AGUIAR

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias da Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte
das exigências para obtenção do título de
Doutora em Engenharia e Ciência dos
Materiais.

Aprovada em 20 de julho de 2016.

Comissão Examinadora:

Prof. João José de Assis Rangel (D.Sc. em Engenharia e Ciência dos Materiais -
UENF) - UCAM/CAMPOS

Prof^a. Angélica da Cunha dos Santos (D.Sc. em Engenharia e Ciência dos Materiais
- UENF) - IFF

Prof^a. Elaine Aparecida Santos Carvalho Costa (D.Sc. em Engenharia e Ciência dos
Materiais - UENF) - UENF

Prof^a. Marcia Giardinieri de Azeredo (D.Sc. em Engenharia Química -
COPPE/UFRJ) - UENF

(Presidente da Banca)

Dedico...

*Aos meus pais Alice e José Roberto.
A minha avó Aguiar (in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por me iluminar e me dar sabedoria nas minhas decisões, e pela fé, coragem, vontade, força e amparo ao longo da minha vida;

A minha orientadora Ana Lucia Diegues Skury, por quem tenho grande carinho e admiração. Por sua amizade, dedicação e paciência, por acreditar na minha capacidade de levar adiante este desafio e chegar ao fim, diante de tantas barreiras a serem vencidas, dedico esta vitória.

Aos professores integrantes da banca examinadora João José de Assis Rangel, Angélica da Cunha dos Santos e Elaine Aparecida Santos Carvalho, por ter aceitado a participar e contribuir com este trabalho;

A professora Márcia Giardinieri de Azevedo por ter aceitado a presidir a banca;

Aos meus pais, Alice e José Roberto, que sempre estiveram presentes, por todas as suas orações, por todo o incentivo, amor, confiança, preocupação e por toda a educação que me proporcionaram;

À minha família, aos meus irmãos, Cristina e Cristiano, às minhas sobrinhas, Gabrielly, Isabelly e Alycia, por todo carinho;

Ao Michel, por me ajudar nas análises de confocal. Ao Gabriel pelas análises do MEV e ao amigo Valdenir por me ajudar no desgaste das minhas amostras.

Aos engenheiros da empresa GT Wire, Mateus Valentin Simmer e Luiz Felipe Gava, por todo suporte para a realização do trabalho.

Aos técnicos da ABRASDI e ao técnico Renan da UENF.

À minha amiga Emilene, pelo apoio e amizade e por estar disponível no momento em que mais precisei;

A todos os amigos que fiz ao longo desses quatro anos de curso;

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
CAPITULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.2. Objetivos	2
1.3 Justificativas	3
1.4. Ineditismo	4
CAPITULO 2	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Rochas Ornamentais	5
2.1.1. Classificação das Rochas Ornamentais	7
2.1.1.1. Mármore	7
2.1.1.2. Granitos	8
2.1.1.2.1 Beneficiamento e aplicações	9
2.2. Ferramentas Diamantadas	10
2.2.1 Breve Histórico	11
2.2.2 Classificação das ferramentas diamantadas	12
2.3. Seleção de diamante para cada tipo de ferramenta	13
2.4. Metalurgia do pó aplicada na fabricação de ferramentas	16
2.4.1. Matriz	17
2.4.1.1. Ligas de Cobalto	19
2.4.2. Processamento	19
2.4.2.1. Preparação da mistura metálica + diamante	19
2.4.2.2. Granulação dos Pós	20
2.4.2.3. Compactação	22
2.4.2.4. Sinterização	25
2.4.2.4.1. Sinterização Convencional	26
2.4.2.4.2. Hot Press (Sinterização assistida por Pressão)	27
2.4.2.4.3. Sinterização por Infiltração	30
2.5. Propriedades Mecânicas da Matriz	32

2.5.1. Dureza	32
2.5.3. Resistência ao Desgaste	33
2.6. Fio Diamantado	37
2.6.1. Cabo de aço	37
2.6.2. Pérolas Diamantadas	38
2.6.3. Revestimento do Fio diamantado	39
2.6.4. Processo de Corte com Fio Diamantado	41
2.6.4.1. Mecanismo de desgaste durante o corte com fio diamantado	42
CAPITULO 3	44
MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Materiais	44
3.2. Seleção das Misturas e Produção das Pérolas Diamantadas	45
3.4. Processos de Fabricação das Pérolas Diamantadas	46
3.4.1 Mistura dos Pós	46
3.4.2. Granulação	47
3.4.3. Compactação a frio.....	49
3.4.4. Medida da densidade a verde das pérolas	50
3.4.5. Sinterização das pérolas.....	51
3.4.6. Montagem, Plastificação e Fechamento do fio.....	53
3.5. Caracterização das Pérolas Sinterizadas	53
3.5.1. Análise Microestrutural	53
3.5.1.1. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	53
3.5.1.2. Difração de Raios X (DRX).....	54
3.5.1.3. Microscopia Confocal	55
3.5.2. Propriedades e Comportamento mecânico.	55
3.5.2.1. Ensaio de desgaste.....	55
3.5.2.2. Dureza Rockwell B	57
3.5.3. Densidade (ρ) das pérolas.....	58
3.5.3.1. Densidade Teórica	58
3.5.3.2. Densidade Aparente.....	59
3.5.3.3. Densidade Relativa	59
CAPITULO 4	60
RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 Pérolas produzidas	60

4.2 Aderência dos compósitos diamantados ao tudo de aço	61
4.3. Aderência dos diamantes à matriz	63
4.4. Caracterização	64
4.4.1. Difração de Raios-X.....	64
4.4.1.1. Difratoograma da Pérola Diamantada B1	65
4.4.1.2. Difratoograma da Pérola Diamantada B2	67
4.4.1.3. Difratoograma da Pérola Diamantada B3	67
4.4.1.4. Difratoograma da Pérola Diamantada B4.	68
4.5. Comportamento Mecânico	70
4.5.1. Ensaio Desgaste.....	70
4.5.2. Dureza	78
4.6. Densidade	80
4.7. Fio Diamantado produzido	82
4.8. Testes dos Fios Diamantados sob condições reais de serviço.....	83
CAPITULO 5.....	89
CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNCIDE A – DIAGRAMA DE FASES	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1998-2015 (Abirochas, 2016)..	06
Figura 2. Tipos comerciais de mármore extraídos do estado da Bahia (BA): A – Mármore Rosa Patamuté; B – Bege San Marino (Costa et al., 2002).....	08
Figura 3. Tipos comerciais de granitos extraídos do estado do Ceará (CE): A Rosa Iracema; B – Kinawa Gold (Frascá, 2001)	09
Figura 4. Fluxograma esquemático de setor, com os principais produtos dos segmentos do ciclo de produção de rochas ornamentais (Peiter, <i>et al.</i> , 2001)	10
Figura 5. Classificação das ferramentas diamantadas (Konstanty, 2005)	12
Figura 6. Diamantes utilizados na fabricação dos anéis diamantados. (a) Diamante natural; (b) Diamante artificial com dopagem de níquel (Konstanty, 2005).....	13
Figura 7. Morfologias assumidas por cristais de diamante sintético (Konstanty, 2005).....	14
Figura 8. Tendência de dureza e resistência de uma matriz metálica em função da presença do tamanho do diamante (Moriguchi <i>et al.</i> , 2007)	15
Figura 9. Fluxograma das etapas convencionais da metalurgia do pó	17
Figura 10. Altura de protusão e interface da matriz com o diamante (Konstanty, 2005).....	18
Figura 11. Granulação previne a segregação dos pós (Grantec Tecnologias Apud Bernardes, 2006).	21
Figura 12. Estágios da movimentação das partículas na cavidade de uma matriz durante o processo de compactação (German, 1999).....	23

Figura 13. Comparação da densificação entre os pós dúcteis e duros (Galiotto, 2005).....	23
Figura 14. Etapas do processo de sinterização convencional. (Grupo Setorial de Metalurgia do pó, 2009).	27
Figura 15. Representações esquemáticas dos três estágios de sinterização e a consequente retração linear durante as etapas de sinterização (Ring, 1996).	29
Figura 16. Estágios da Sinterização em fase líquida (German, 1985).	30
Figura 17. Modelo esquemático da sinterização com infiltração de um determinado pó. (Gordeev <i>et al.</i> ,2004).....	31
Figura 18. Curvas da variação de dureza em função da temperatura de consolidação da matriz (Pacheco <i>et al.</i> , 2007).....	32
Figura 19. Micrografia que mostra a progressão de desgaste dos diamantes – a) partícula emergida, b) desgaste plano, c) desgaste plano e rugoso e d) desgaste rugoso (Element Six Ltda, 2003).	34
Figura 20. Variação da taxa de desgaste linear durante progressão de desgaste dos diamantes (Element Six Ltda, 2003).....	35
Figura 21. Distribuição da classificação do modo de desgaste das partículas de diamantes durante progressão de desgaste dos diamantes (Element Six Ltda, 2003).....	36
Figura 22. Efeito da taxa de corte no desempenho da ferramenta (Element Six Ltda, 2003).....	36
Figura 23. Composição do cabo de aço.....	37
Figura 24. (a) Pérola Sinterizada; (b) Pérola Eletrolítica (Diamant Boart, 2008)...	38
Figura 25. Pérola diamantada produzida por metalurgia do pó (Tonshoff e Apmann, 2002).	39
Figura 26. Fio diamantado revestido (a) com molas metálicas, (b) em plástico, (c) em borracha (Diamant Boart, 2008).	39

Figura 27. Molde de injeção do revestimento no fio diamantado (Steinvarz, 2005 apud Regadas, 2006).....	40
Figura 28. (a) Máquina multifio diamantado; (b) Execução do corte com máquina de multifio diamantado (Cimef Metalúrgia, 2015).	41
Figura 29. Fio diamantado durante a operação de corte (Ozcelik, <i>et al.</i> , 2002)....	42
Figura 30. Esquema do corte de rochas com o fio diamantado (Bortolussi, <i>et al.</i> , 1994).....	43
Figura 31. Seleção das misturas para produção das pérolas	45
Figura 32. Fluxograma do Processo de Produção das Pérolas Diamantadas.	46
Figura 33. Misturador do tipo Turbula – Marca F. LLI Milano (GT Wire).....	47
Figura 34. Batedor do tipo helicoidal (GT Wire).....	48
Figura 35. Granulador (GT Wire).....	48
Figura 36. Pó granulado seguindo para secagem (GT Wire)	49
Figura 37. Peneira separadora dos grânulos (GT Wire).....	49
Figura 38. (a) pérola à verde; (b) controle dimensional	50
Figura 39. Balança automática utilizada para as medidas de densidade Marca KERN (GT Wire).	50
Figura 40. Bandeja de grafite já prontas para serem levadas para o forno (GT Wire).	51
Figura 41. Forno de sinterização com atmosfera controlada (GT Wire)	52
Figura 42. Parâmetros utilizados na Sinterização (GT Wire).....	52
Figura 43. Núcleo de plastificação dos fios (GT Wire).....	53
Figura 44. Microscópio Eletrônico de Varredura (LAMAV/UENF).....	54

Figura 45. Microscópio confocal a laser Olympus modelo LEXT OLS4000 (LAMAV/UENF).....	55
Figura 46. Abrasímetro, marca AROTEC (LAMAV/UENF).....	56
Figura 47. Durômetro utilizado para medições de dureza Rockwell B, marca ERSNT, modelo NR 3D (GT Wire).....	58
Figura 48. Exemplo das pérolas produzidas.	60
Figura 49. Fotografia da pérola após o teste com morsa.	61
Figura 50. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B1 e (b) B2	62
Figura 51. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B3 e (b) B4.....	63
Figura 52. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B1, (b) B2, (c) B3 e (d) B4.	64
Figura 53. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B1.	65
Figura 54. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B2.	67
Figura 55. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B3.	68
Figura 56. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B4.	69
Figura 57. Difratoograma de Raios-X obtido na análise das pérolas diamantadas B1, B2, B3, e B4.	70
Figura 58. Gráfico da resistência a abrasão <i>versus</i> tempo obtido no teste de desgaste das pérolas diamantadas no tempo final de 30 minutos.....	71
Figura 59. Gráfico da resistência a abrasão <i>versus</i> tempo das pérolas diamantadas.	73
Figura 60. Microscopia Confocal da Pérola B1 após o desgaste.....	75

Figura 61. Microscopia Confocal da Pérola B2 após o desgaste.....	76
Figura 62. Microscopia Confocal da pérola B3 após o desgaste.	77
Figura 63. Microscopia Confocal da pérola B4 após o desgaste.	78
Figura 64. Gráfico de Dureza Rockwell B das Pérolas diamantadas.....	79
Figura 65. Gráfico da média da Dureza Rockwell B das Pérolas diamantadas. ...	79
Figura 66. Comportamento da densificação média das pérolas diamantadas.	82
Figura 67. Fotografia dos fios diamantados a) B1 e b) B2 produzidos na empresa GT Wire.	83
Figura 68. Cabos esticados no tear prontos para início do corte.....	84
Figura 69. Detalhe das pérolas B1 e B2 prontos para início do teste.	84
Figura 70. Diâmetro das pérolas (a) B1e (B2) após as serradas.....	86
Figura 71. Diâmetro da pérola comercial após as serradas.....	86
Figura 72. Cabos B1 e B2 após as serradas.....	87
Figura 73. Cabos (a) B3 e (b) B4 prontos.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composições de todas as amostras produzidas.....	45
Tabela 2. Resultados da perda de massa e Resistência ao desgaste após teste de abrasão de 30 minutos.....	71
Tabela 3. Resistência a abrasão das pérolas diamantadas	72
Tabela 4. Dureza (HB) das amostras B1, B2, B3 e B4.....	78
Tabela 5. Densidade das pérolas “verde”.....	80
Tabela 6. Densidade das pérolas sinterizadas.....	81
Tabela 7. Controle de produção da empresa GT Wire.....	85

RESUMO

Neste trabalho, foram estudadas pérolas diamantadas à base de Fe-Cu-Co-P com Ni, Sn e WC como aditivos, em diferentes concentrações e formulações de abrasivos a fim de serem aplicadas como segmentos de corte em fio diamantado para o processamento de rochas ornamentais. O objetivo principal foi alcançar maior eficiência de corte do que os fios atualmente utilizados na indústria. A pesquisa foi executada em quatro blocos. O bloco 1 (B1) é composto por pérolas à base de Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC com adições diamantes em diferentes granulometrias. O bloco 2 (B2) é formado por pérolas à base de Fe- Cu-Co-P-Ni-Sn-WC com B₄C e diamante. O bloco 3 (B3) é formado por pérolas à base de Fe- Cu-Co-P-Ni-Sn-WC com ZrC e diamante. Finalmente o bloco 4 (B4) é composto por pérolas à base de Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC com cBN e diamante. As pérolas diamantadas foram produzidas por sinterização convencional, em forno de esteira com atmosfera controlada, a qual é rota industrial de fabricação da metalurgia do pó. Foi verificada, de maneira empírica, a aderência da matriz diamantada ao tubo com o equipamento morsa e apenas as pérolas B1 e B2 foram autossoldáveis. As pérolas obtidas foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios X, ensaios de dureza HRB, densidade relativa e testes de resistência a abrasão em um simulador físico, acompanhados por microscopia confocal. A pérola B1 apresentou maior densidade relativa e dureza. Houve uma boa adesão do diamante na matriz de B4, o que provavelmente, pode ter resultado em uma maior resistência ao desgaste. Foram produzidos fios diamantados com a montagem das pérolas diamantadas e apenas os fios com as pérolas B1 e B2 foram submetidos em condições reais de trabalho. Estes apresentaram desempenho superior quando comparado com o comercial. Porém, os testes com os fios diamantados B1 e B2 não foram até o final de sua vida útil devido ao rompimento do cabo comercial, resultando na inutilização de todo o jogo. Os estudos, aqui conduzidos, servem como base para o desenvolvimento de novas pesquisas direcionadas à produção de fios diamantados para corte de rochas ornamentais.

Palavra-chave: Fio diamantado, autossoldável, sinterização convencional, rochas ornamentais.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study diamond beads of Fe-Cu-Co-P with Ni, Sn and WC as additives, in different abrasive concentrations and formulations, in order to be applied as cutting segments in diamond wire to the processing of ornamental stones. The main objective was to achieve a higher cutting efficiency than the wires that are being used in the industry nowadays. This research was executed in four blocks. Block 1 (B1) consists of beads of Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC with diamond addition in different aggregate gradations. Block 2 (B2) comprises beads of Fe- Cu-Co-P-Ni-Sn-WC with B₄C and diamond. Block 3 (B3) is made of beads of Fe- Cu-Co-P-Ni-Sn-WC with ZrC and diamond, and Block 4 (B4) is composed of beads of Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC with cBN and diamond. Conventional sintering produced the diamond beads in belt furnace with controlled atmosphere, which is the industrial route for manufacture of the powder metallurgy. It was verified empirically the adherence of the diamond matrix to the tube with the vise equipment and only the beads B1 and B2 were weldable to themselves. The beads obtained were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction, hardness testing (HRB), relative density and resistance testing to abrasion in a physical simulator, accompanied by the confocal microscopy. The bead B1 presented higher relative density and hardness. There was a good adherence of the diamond in the B4 matrix, which may have resulted in a higher wear resistance. It was produced diamond wires with the assembly of the diamond beads and only the wires with the beads B1 and B2 were submitted into work conditions. They presented superior performance when compared with the commercial one. However, the tests with the diamond wires B1 and B2 did not reach the end of their useful life due to the break of the commercial cable, which resulted in the rupture of all the other cables that were in the mechanism. Studies conducted here serve as a basis for the development of new researches focusing on production of diamond wires for cutting of ornamental stones.

Keywords: diamond wire, weldable to themselves, conventional sintering, ornamental stones.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais são um produto com elevado interesse devido às propriedades características e grande diversidade de aplicações (Monteiro *et al.*, 2014).

As técnicas de corte aplicadas na exploração e beneficiamento de rochas ornamentais requerem uma constante evolução da tecnologia de corte, desbaste e polimento dos produtos, desde a extração dos blocos dos maciços rochosos até o acabamento das peças (Fang *et al.*, 1998; Oliveira e Filgueira, 2007; Almeida, 2012; Sideris Junior, 2013; Jain *et al.*, 2013; Monteiro *et al.*, 2014; Yilmazkaya *et al.*, 2016).

Nota-se atualmente uma crescente evolução das várias tecnologias existentes de corte e beneficiamento de rochas e também o desenvolvimento de novos tipos de ferramentas, em especial dos compósitos diamantados utilizados em tais ferramentas. Nesse contexto, em particular, insere-se o corte de rochas por fios diamantados, tanto na extração dos blocos (monofios), quanto no seu desdobramento em chapas (teares multifios).

O corte de rochas utilizando o fio diamantado é uma técnica relativamente recente e vem crescendo em diversos setores industriais, principalmente na construção civil e na exploração das rochas ornamentais. O fio diamantado foi inventado pela Diamant Boart, há cerca 35 anos, cuja finalidade era a extração de mármore (Diamant Boart, 2008).

Esta tecnologia apresenta uma elevada versatilidade de operações de corte, sendo caracterizada pela sua elevada velocidade de corte.

Além disso, o corte com fio diamantado consegue reduzir a espessura média de corte e conseqüentemente, reduzir o desperdício de rocha em comparação com outras tecnologias, tais como a extração como uso de flame jet ou pelo método de explosões e no desdobramento dos blocos quando comparado com o talha blocos.

Embora o Brasil figure atualmente como sétimo maior exportador de rochas ornamentais do mundo (Abirochas, 2013), não existe no país nenhuma produção com tecnologia própria do fio diamantado. Notadamente o Brasil é um importador de

ferramentas diamantadas. Entretanto, cabe ressaltar que o grupo de pesquisas Materiais Superduros (GMSD), inserido no Setor de Materiais superduros do LAMAV, há mais de uma década vêm envidando esforços no sentido de desenvolver compósitos diamantados destinados tanto para aplicação em serras de corte (Almeida, 2012; Sideris Junior, 2013, Oliveira, 2010), quanto para produção das pérolas para a produção de fios (Filgueira, 2000, Oliveira, 2005, Moreira Junior, 2013). Porém, destas pesquisas somente a produção de serras passou para a escala industrial feita hoje pela ABRASDI, a qual já há mais de cinco anos apoia as pesquisas do grupo. Por outro lado, a produção industrial de fios diamantados com tecnologia 100% nacional ainda não foi implantada.

Neste contexto, visando o desenvolvimento da produção industrial do fio diamantado com tecnologia própria, e a partir de matéria prima nacional o GMSD em parceria com a ABRASDI e a GT Wire, foi desenvolvida essa tese. A GT Wire é uma empresa produtora de fios diamantados, situada em Cachoeiro de Itapemirim (ES). Essencialmente sua produção de fios está baseada na tecnologia italiana. Entretanto, toda a matéria prima (exceto a etapa de plastificação) é totalmente importada. A matéria-prima para a produção das pérolas é constituída principalmente por pós pre-ligados (ligas comerciais tais como Next, Cobalite, Mastertec entre outras)

Assim, é neste contexto que se insere esta tese, cujo desafio foi desenvolver pérolas, a partir de matéria-prima nacional, para produção em escala industrial do fio diamantado de forma economicamente viável e eficiente.

1.2. OBJETIVOS

Esta tese tem como objetivo principal a fabricação de pérolas destinadas para a produção industrial de fios diamantados a partir da matriz metálica Fe-Cu-Co-P com Ni, Sn e WC como aditivos, em diferentes concentrações e formulações dos abrasivos.

Para o alcance deste objetivo, constituem-se em objetivos específicos:

- Produzir e caracterizar pérolas nas várias composições propostas.
- Avaliar o efeito das formulações dos abrasivos sobre as propriedades mecânicas (dureza e resistência ao desgaste) e microestrutura das pérolas.

- Avaliar o grau de adesão da matriz diamantada no suporte da pérola, ou seja, verificar se a pérola é autossoldante.
- Produzir os fios diamantados em condições industriais
- Testar os fios em condições reais de trabalho.

1.3 JUSTIFICATIVAS

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais, apresentando uma produção bruta de 10 milhões de toneladas/ano de rochas ornamentais (Abirochas, 2016). Esta expressiva produção se deve principalmente pelo avanço tecnológico alcançado na produção de ferramentas diamantadas para extração e produção de rochas ornamentais, em especial dos fios diamantados.

No Brasil, uma significativa parte das empresas beneficiadoras de rochas ornamentais ainda utiliza o corte por tear com granalha de aço (talha blocos) no desdobramento dos blocos em chapas de rochas, embora atualmente nota-se uma tendência para o corte por fio diamantado em substituição aos métodos tradicionais (talha blocos ou teares de serras diamantadas).

Quando comparada com os métodos tradicionais, a técnica de corte por fio diamantado possui inúmeras vantagens, tais como: corte em menor tempo, melhor aproveitamento da rocha, corte mais preciso e menor produção de resíduos provenientes da operação de corte (Monteiro *et al.*, 2014).

Existem alguns fornecedores de fios diamantados no Brasil, sendo grande parte dos fios importados da Itália e China. Não foram encontrados dados demonstre que existam outros fabricantes de fios diamantados além da GTWIRE. A maioria das empresas que fornecem fios diamantados nacional, não são fabricantes, apenas montadores de fio. Porém, cabe ressaltar, que esta empresa ainda utiliza insumos importados para a produção do fio. O preço do fio diamantado praticado no mercado internacional (Itália) por cerca de US\$ 60,00 por metro de ferramenta, por serem consideradas como ferramentas sofrem altas taxações alfandegárias chegando ao Brasil com um preço médio de US\$ 160,00 (Monteiro *et al.*, 2014).

Portanto, o investimento na nacionalização desta tecnologia é fundamental para reduzir os custos de beneficiamento de rochas ornamentais mantendo a qualidade do produto.

Adicionalmente, a minimização do uso de cobalto nas ligas empregadas no processo, aumento da eficiência de corte, e a redução dos custos de fabricação é uma necessidade tanto econômica quanto ambiental. Portanto, é necessário o desenvolvimento de pesquisas para o avanço tecnológico e científico dos fios diamantados no Brasil, fato que justificou a execução da presente tese.

1.4. INEDITISMO

Este é um trabalho inovador, uma vez que não foram encontrados dados na literatura que produzam compósitos diamantados a partir do sistema estudado. Além disso, no que diz respeito à utilização das composições dos abrasivos aplicados na produção de pérolas diamantadas, não foram encontrados dados na literatura especializada, o que deixa claro o ineditismo desta tese.

Assim, para comprovação do ineditismo deste trabalho, foi efetuada uma busca na base de conhecimento *ProQuest – Engineered Materials Abstracts* e na base *Scopus* no dia 10 de novembro de 2015 e não foram encontrados dados na literatura.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ROCHAS ORNAMENTAIS

Rochas ornamentais, também conhecidas como pedras naturais e rochas dimensionadas, compreendem os materiais geológicos naturais. Elas correspondem a tipos litológicos extraídos em blocos ou placas e posteriormente beneficiadas em diversas formas. Podem ser aplicadas tanto em peças isoladas (tampos de mesa, balcões, esculturas e artes funerárias em geral), como também em edificações (Vidal, 2002).

Diante de suas propriedades de resistências e durabilidade, as rochas ornamentais são utilizadas em construções há milhares de anos. Essa característica foi percebida facilmente por grandes povos da antiguidade e seus vestígios se encontram até hoje em nosso meio, como é o caso dos templos gregos, das gigantes pirâmides egípcias, e das grandes construções incas, astecas e maias nas Américas (Vidal, 2002).

A produção de rochas é influenciada de forma marcante pelo avanço tecnológico, contribuindo assim para uma produção em larga escala.

Segundo a Abirochas (2015), o setor brasileiro de rochas ornamentais nos últimos 30 anos se caracterizou por uma era de rápido crescimento, resultando em uma evolução silenciosa e persistente de sua indústria. Quando se avalia um período de longa duração, há uma expansão da produção brasileira de rochas muito rápida. O Brasil fica atrás apenas da China, Índia e Turquia na produção de rochas.

A estrutura produtiva do setor brasileiro de rochas ornamentais, é representada pelos estados: Espírito Santo, maior estado produtor, seguido os estados de Minas Gerais, Ceará e Bahia. Esses estados representam 80% do volume de lavras.

O Brasil apresenta uma produção bruta de 9,5 milhões de toneladas/ano de rochas ornamentais, abrangendo cerca de 1200 variedades comerciais. Este setor emprega aproximadamente 120 mil pessoas diretamente e apresenta uma capacidade de produção de 50 milhões de m²/ano de rochas, destinada em sua

maior parte ao consumo interno e as exportações de produtos manufaturados. As razões para o seu sucesso, entretanto, referem-se a capacidade de explorar seus materiais através de políticas setoriais adequadas, desde a lavra até a industrialização (Abirochas, 2016).

A Figura 1 mostra o gráfico a evolução das exportações de rochas ornamentais brasileiras. Observa-se um crescimento gradativo de 1998 a 2007, um ponto de inflexão observado nos anos entre 2008 e 2009 se deu devido à crise econômica global, logo, em 2010 as exportações voltam a crescer chegando ao seu pico em 2013. Já nos dois últimos anos, verifica-se uma queda no faturamento das exportações (Abirochas, 2016).

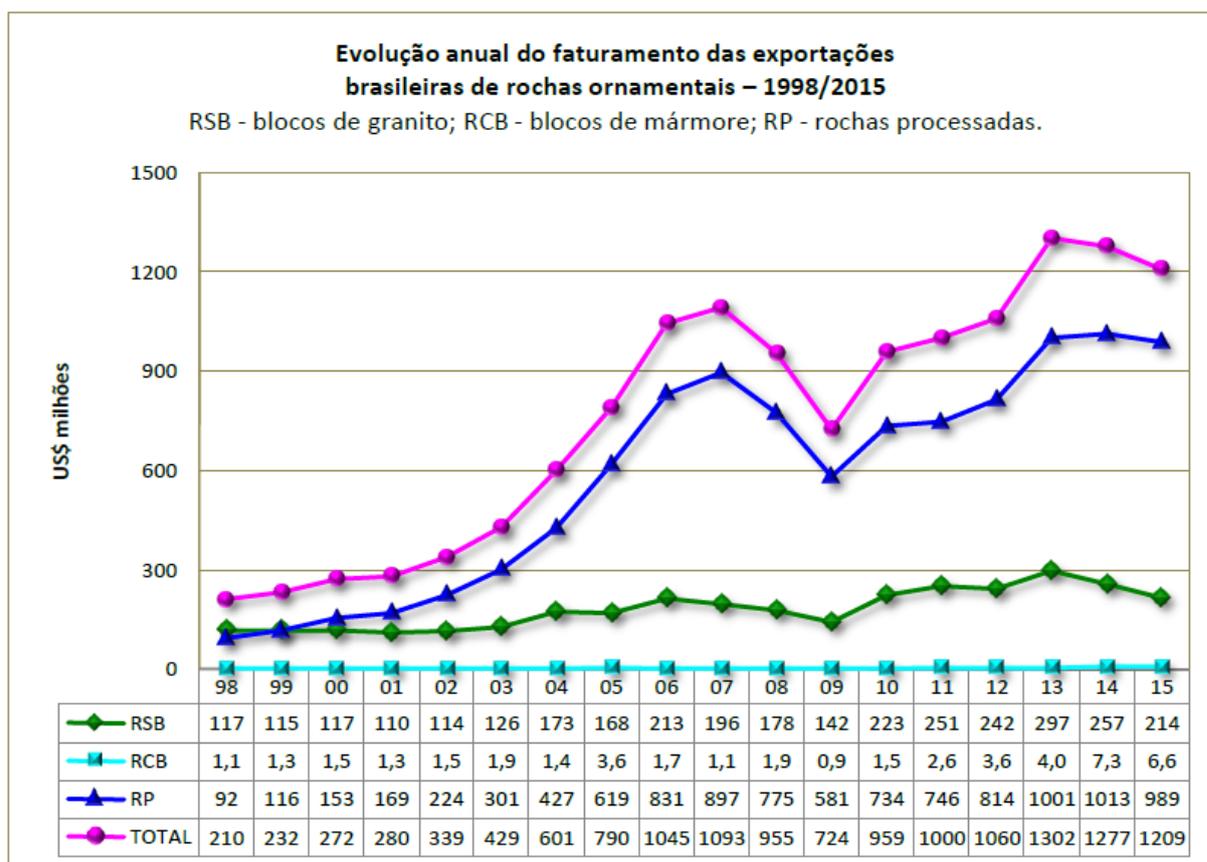


Figura 1. Evolução do faturamento das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1998-2015 (Abirochas, 2016).

Mesmo diante deste cenário, a partir de 2013 o estado do Espírito santo figura no ranking mundial como o sétimo produtor mundial de rochas ornamentais, terceiro lugar como exportador de blocos e, neste contexto o Brasil figura como o quinto maior consumidor de rochas ornamentais (Abirochas, 2015).

2.1.1. Classificação das Rochas Ornamentais

Costa *et al.*, (2002) classifica as rochas ornamentais de acordo com a composição como: granitos, quartizitos, mármore, ardósias e Esteatitos (pedra sabão).

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais e de revestimento são basicamente classificados em granitos (rochas silicáticas) e mármore (rochas carbonáticas), que perfazem cerca de 80% da produção mundial. Embora esta classificação nem sempre, em termos geológicos, seja correta, outras rochas vem sendo utilizadas ardósias, quartizitos, pedra sabão, serpentinitos, basaltos, conglomerados, também se destacam setorialmente (Vidal, 2002).

Para a distinção entre um granito (Rocha silicática) e um mármore (rocha carbonática), dois procedimentos simples são recomendados: os granitos não são riscados por canivetes e chaves; os mármore, inclusive travertinas, são riscados por canivetes/chaves e reagem ao ataque de ácido clorídrico (HCl) a 10% em volume, efervescendo tanto mais intensamente quanto maior o caráter calcítico (na falta de ácido clorídrico, pode-se pingar limão).

Serpentinitos e ardósias não reagem ou apresentam reação discreta com HCl, e podem ser riscados por canivetes. Os quartizitos, muitas vezes assemelhados aos mármore, não são riscados por canivetes/chaves e nem efervescem com ácido clorídrico ou limão.

2.1.1.1. Mármore

No setor de rochas ornamentais e de revestimento, o termo mármore é empregado para designar todas as rochas carbonáticas de origem metamórfica ou sedimentar, capazes de receber polimento e lustro. Os mármore apresentam grande variedade de cores com diferentes tons variando entre o bege (Figura 2B), rosa (Figura 2A), salmão, marrom e outros (Costa *et al.*, 2002).

Em função do grau metamórfico, estas rochas apresentam granulação variando de fina a média. Tem como minerais acessórios a calcita e dolomita e como minerais secundários quartzo, pirita, feldspato, mica, anfibólios, diopsídio, entre outros. Com qualificação ornamental ou de revestimento, destacam-se os tipos de

grão fino, com larga aplicação no setor estatuário. Os mármore apresentam massa específica de 2,40 a 2,80 kg/dm³ e porosidade total entre 5,0 a 12,0% (Vidal, 2002).

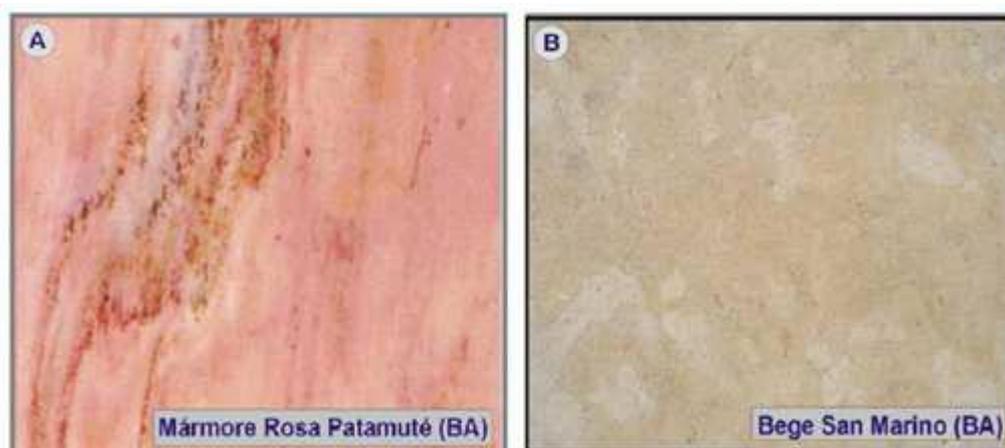


Figura 2. Tipos comerciais de mármore extraídos do estado da Bahia (BA): A – Mármore Rosa Patamuté; B – Bege San Marino (Costa *et al.*, 2002).

2.1.1.2. Granitos

Os granitos correspondem a um amplo conjunto de rochas silicáticas, cuja associação mineralógica mais comum apresenta uma composição de quartzo, feldspatos e micas (Chiodi Filho e Rodrigues, 2009).

O crescimento recente da participação relativa dos granitos foi, pelo menos em parte, determinado por sua maior durabilidade e resistência em relação aos mármore, além dos padrões estéticos diferenciados e possibilidades de paginação em pisos e fachadas. São as rochas ornamentais mais procuradas para revestimentos tanto em pisos como em fachadas, devido à sua grande variedade de cores e padrões texturais e estruturais, não perdendo brilho de polimento durante muitos anos, além da sua beleza visual (Fracá, 2001).

Os granitos homogêneos são conhecidos como “clássicos” (Figura 3A) e os granitos movimentados e desenhados, em padrão fantasia, são bastante apreciados no mercado (Figura 3B). O granito possui massa específica variável de 2600 a 2850 kg/m³; porosidade total em torno de 0,4 a 1,2% (Rodrigues e Ferraz, 2009 apud Idemburgo, 2012).

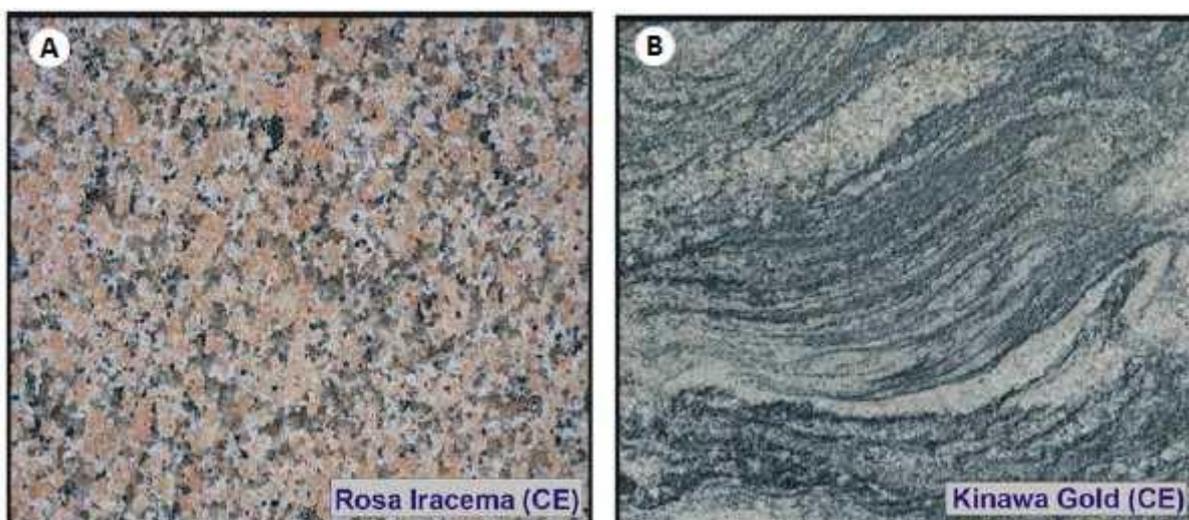


Figura 3. Tipos comerciais de granitos extraídos do estado do Ceará (CE): A – Rosa Iracema; B – Kinawa Gold (Fracá, 2001).

2.1.1.2.1 Beneficiamento e aplicações

As rochas ornamentais são submetidas às mais variadas solicitações. Estas surgem desde a etapa de extração, no decorrer do beneficiamento (serragem, corte, polimento) até a aplicação final nas obras e, posteriormente, ao longo do uso.

As aplicações das rochas ornamentais podem ser consideradas abrangentes pela infinidade de usos e utilizações, principalmente através da combinação de suas qualidades estruturais e estéticas. Estas aplicações podem ser reunidas em 4 grupos: arquitetura e construção, construção e revestimento de elementos urbanos, arte funerária e arte e decoração.

Em qualquer das principais aplicações, este ciclo produtivo pode ser dividido em 4 (quatro) etapas bem definidas, desde a atividade mineral até a conformação dos produtos finais: pesquisa, exploração, beneficiamento primário e final, conforme mostrado na Figura 4.

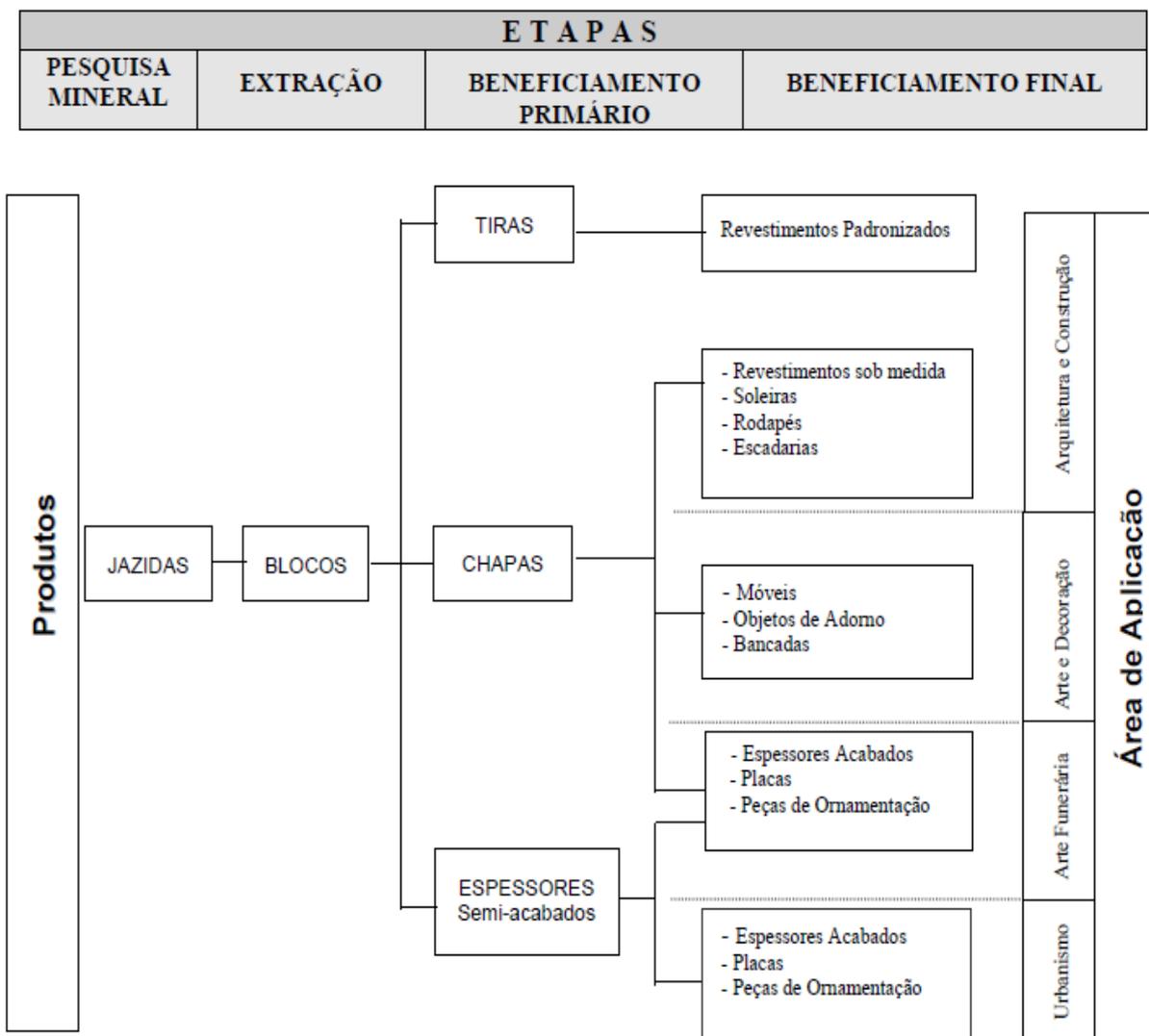


Figura 4. Fluxograma esquemático do setor, com os principais produtos dos segmentos do ciclo de produção de rochas ornamentais (Peiter *et al.*, 2001).

2.2. FERRAMENTAS DIAMANTADAS

Nas diferentes áreas de aplicação, o uso e a substituição de alguns tipos de ferramentas diamantadas são crescentes. Ferramentas de corte diamantadas, como, fios de pérolas diamantadas, serras lineares e circulares entre outras, são utilizadas no desmonte, corte e polimento de rochas ornamentais, materiais metálicos não-ferrosos e materiais cerâmicos (Filgueira e Pinatti, 2001).

Do ponto de vista tecnológico, a necessidade do aumento do desempenho das ferramentas diamantadas possibilita aumentar sua eficiência e vida útil. A utilização destas ferramentas facilita a manufatura de peças de diversos tipos de materiais tais como, corte de vidro, mármore, granito e concreto, a perfuração de

poços de petróleo e gás. Neste contexto, o uso de ferramentas diamantadas proporciona, nestas atividades, um aumento de produtividade em dezenas de vezes, obtendo, principalmente, novos resultados no acabamento final do produto, especialmente no caso das rochas ornamentais (Almeida, 2012).

No caso das rochas ornamentais, as ferramentas diamantadas são de extração e beneficiamento, sendo aplicadas no desmonte dos blocos nas pedreiras (fio diamantado), no desdobramento dos blocos (obtenção das chapas -teares de fios, serras ou facões diamantados), no corte das chapas (serras diamantadas), no desbaste e no polimento das chapas. Neste contexto, nota-se que o setor de rochas ornamentais é extremamente dependente das ferramentas diamantadas.

2.2.1 Breve Histórico

Segundo Hughes (1980), o primeiro marco na história das ferramentas diamantadas, foi o desenvolvimento do fio diamantado em 1819, porém apenas 40 anos depois que este foi utilizado para uso prático. Em 1854 foi desenvolvida a primeira ferramenta de corte diamantada com cristal único.

De acordo com Hughes (1980) o surgimento da primeira serra circular de corte ocorreu na França em 1885, a sua utilização se deu na década de 1900 para corte de calcário e mármore em construções de grandes edifícios. Já no período de 1927 e 1931, houve a produção da primeira ferramenta abrasiva de matriz metálica, fabricadas a partir de pó. De acordo com Gauthier (1927), a mistura dos pós era somente consolidada a frio. Em 1931, Neven sugeriu a prensagem a quente. O primeiro pó metálico utilizado foi o ferro eletrolítico. Essa ideia de ligar diamantes a pós metálicos veio a partir de ideia de Gay em 1883, que incorporou materiais abrasivos, como a quartzo e esmeril a uma matriz de metal (Jones, 1960).

O uso das ferramentas diamantadas foi marcadamente impulsionado após o desenvolvimento da produção industrial do diamante sintético. Em 1955 a General Electric anunciou sua capacidade de fabricar diamantes sintéticos em escala industrial (Bundy *et al.*, 1955).

2.2.2 Classificação das ferramentas diamantadas

Desde a criação dos diamantes sintéticos na década de 50, as ferramentas diamantadas vêm sofrendo considerável avanço. As ferramentas diamantadas são utilizadas para cortes de materiais extremamente duros, tais como cerâmicas, rochas, concretos e vidros. Podem ser usados para perfuração, cortes, acabamento e polimentos.

Serras lineares e circulares, coroas de polimento, fios de pérolas diamantadas dentre outros, são ferramentas de corte diamantadas usadas no desmonte, corte, e polimento de rochas ornamentais, materiais cerâmicos e metais não-ferrosos em geral (Filgueira e Pinatti, 2001).

Segundo Konstanty (2005), a classificação das ferramentas diamantadas é baseada em diversos critérios. Podem ser classificadas de acordo com o diamante envolvido e a sua origem, aparência externa e estrutura interna da ferramenta e também sua aplicação.

Os tipos de ferramentas diamantadas está organizado em categorias e são distintos em relação as diversas metodologias de fabricação envolvidas, conforme mostra a Figura 5.

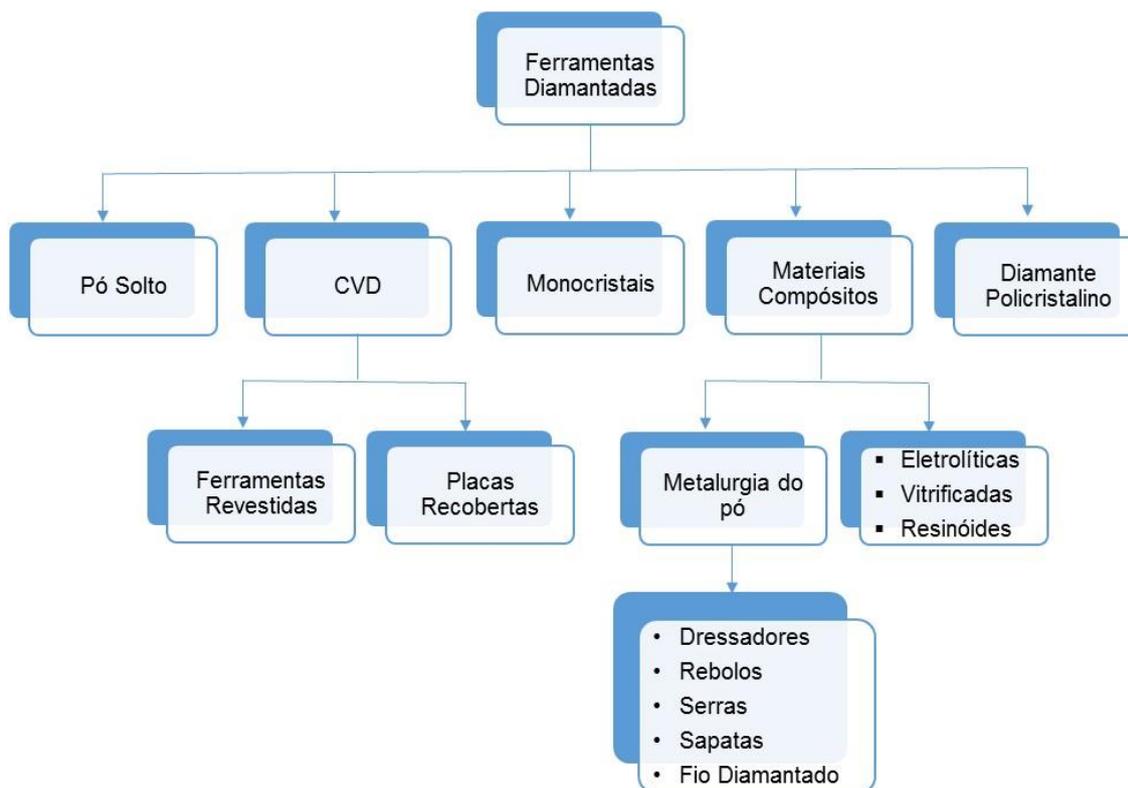


Figura 5. Classificação das ferramentas diamantadas (Konstanty, 2005).

2.3. SELEÇÃO DE DIAMANTE PARA CADA TIPO DE FERRAMENTA

Há centenas de anos, o diamante é utilizado em ferramentas destinadas para corte. Na década de 50, iniciou-se o uso de diamante sintético, mas foi na década de 70 que ampliou a técnica para produção industrial do diamante (Clark e Sen, 1998).

As características do diamante sintético monocristalino são conferíveis com as características do diamante natural e com isso, são utilizados para produção das pérolas diamantadas destinadas para o corte e desmonte de rochas ornamentais. Porém, a estabilidade térmica do diamante natural é muito superior ao do diamante artificial, podendo tolerar temperaturas superiores a 1400 °C, enquanto o diamante sintético tolera temperaturas próximas a 850 °C (Konstanty, 2005).

A Figura 6 mostra a micrografia do diamante natural e sintético. A dopagem por elementos químicos utilizados na fabricação dos diamantes artificiais conferem cores que podem ir do amarelo ao verde, diferindo assim do diamante natural.

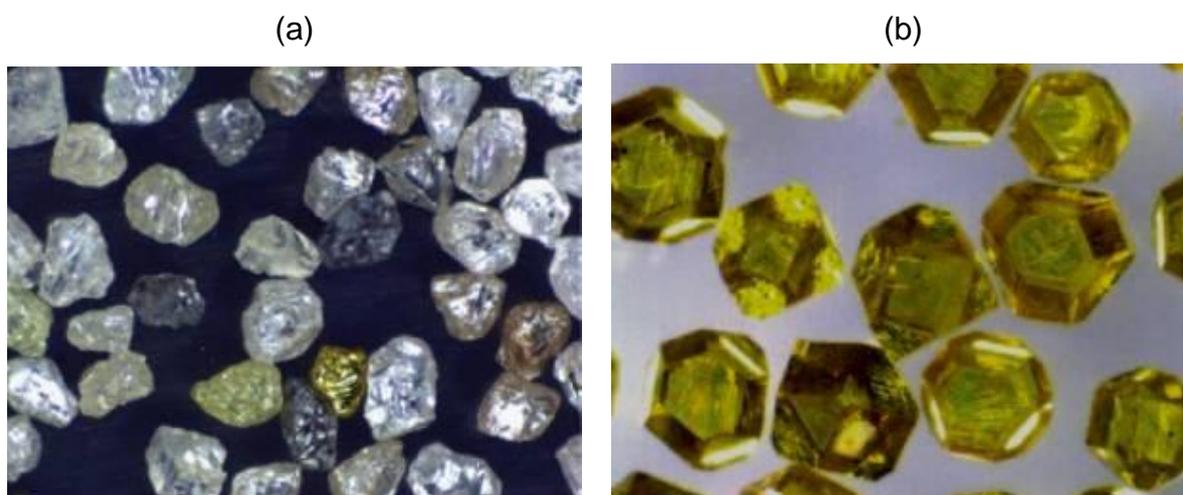


Figura 6. Diamantes utilizados na fabricação dos anéis diamantados. (a) Diamante natural. (b) Diamante artificial com dopagem de níquel (Konstanty, 2005).

O plano de crescimento dos cristais de diamantes depende da temperatura e pressão que são usadas em sua fabricação. A morfologia que os cristais assumem são do sistema cubo-octaédrico, verificado na Figura 7 (Konstanty, 2005).

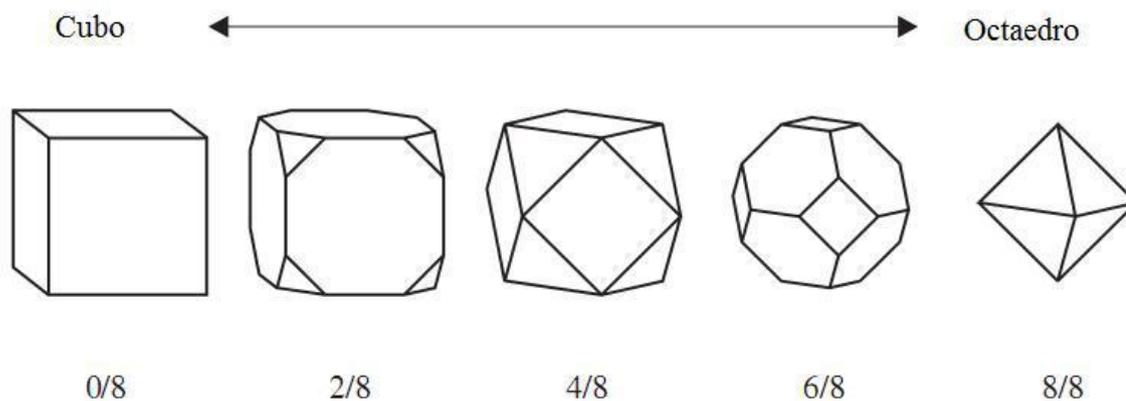


Figura 7. Morfologias assumidas por cristais de diamante sintético (Konstanty, 2005).

De acordo com trabalhos realizados por Nitkiewicz e Swierzy (2006) foi provado que há uma relação direta entre a forma do diamante e o desempenho do corte da ferramenta. Em materiais menos rígidos, são utilizados diamantes com formas irregulares ou fragmentados, enquanto que, em materiais mais rígidos são usados diamantes com formas cúbicas e octaédricas (Bailey, 1987).

Os diamantes naturais exibem formas irregulares e com isso são escolhidos na aplicação de ferramentas diamantadas. Cristais de diamantes que possuem morfologia regular são mais resistentes quando comparados com os irregulares. Porém, grãos com características irregulares oferecem mais arestas de corte e uma melhor ancoragem a matriz (Konstanty, 2003).

A granulometria dos cristais de diamantes implicam em sua distribuição ao longo da matriz uma vez que grãos menores tendem a formar aglomerados, ao passo que tamanhos maiores são mais uniformemente distribuídos (Wu e Funkenbusch, 2010).

Segundo Moriguchi *et al.* (2007), os cristais de diamante presentes na matriz influenciam na tenacidade à fratura. Já a dureza da matriz, é pouco influenciada pela presença dos cristais. Como pode ser observado na Figura 8, de acordo com que aumenta a granulometria dos diamantes na matriz a tenacidade a fratura é elevada consideravelmente até um valor máximo para o tamanho de partícula de 12 μm aproximadamente. Acima desse valor de granulometria, observa-se um aumento menos acentuado de tenacidade. Tonshoff e Apmann (2002) explicam que o menor aumento da tenacidade se deve à influência do tamanho de partículas e sua concentração sobre as propriedades mecânicas da matriz e, conseqüentemente, o desempenho de corte das ferramentas.

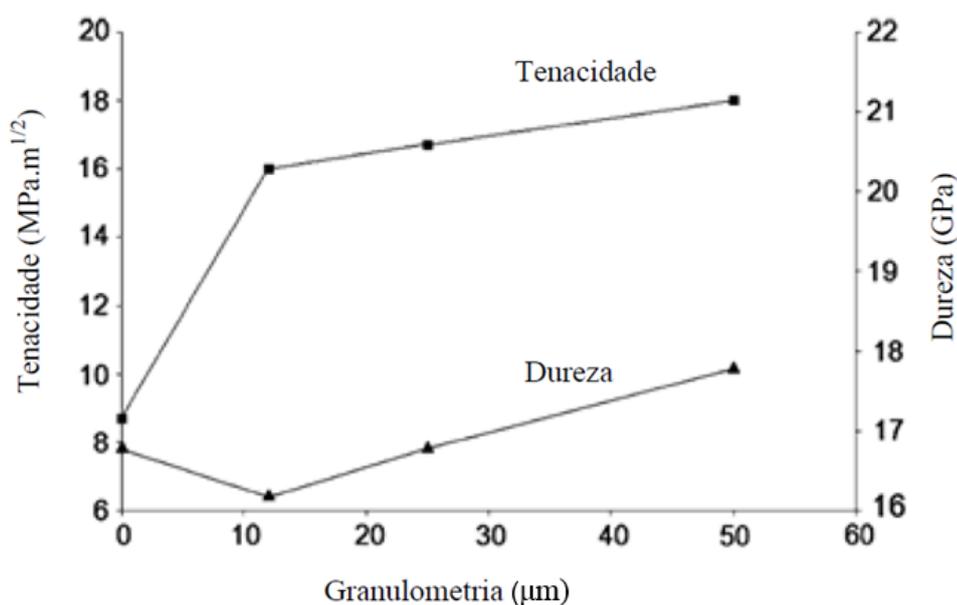


Figura 8. Tendência de dureza e resistência de uma matriz metálica em função da presença do tamanho do diamante (Moriguchi *et al.*, 2007).

O uso efetivo de diamantes em ferramentas diamantadas depende dos materiais que são usados para manter e ancorar os diamantes enquanto a ferramenta é submetida ao trabalho de corte. Os metais usados para a fabricação da ferramenta diamantada devem segurar firmemente os diamantes e deve ser desgastado a uma taxa ideal para manter os diamantes expostos para uma máxima eficiência de corte. Portanto, devem ser observadas algumas características importantes das matrizes utilizadas na fabricação da ferramenta diamantada Zeren (2007), tais como:

- **Resistência ao Desgaste:** a ligação entre a matriz e o diamante deve ser forte o suficiente para um bom desempenho. Nesse contexto, a abrasividade do material a ser cortado e a resistência ao desgaste da matriz que compõe a ferramenta devem estar em condições compatíveis. A utilização de uma matriz muito dúctil pode fazer com que ocorra uma perda antecipada de cristais de diamantes presentes na matriz durante o trabalho de corte. Porém se houver uma aderência muito forte entre a matriz e o diamante, poderá causar um aplainamento da superfície do segmento devido à ocorrência de um desgaste mais lento do que a quebra dos cristais. Estas duas situações causam uma redução considerável na vida útil da ferramenta de corte diamantada Zeren (2007).

- **Aderência dos cristais de diamante à matriz:** a matriz ligante deverá permitir uma aderência eficiente dos cristais de diamantes durante a operação de corte. A aderência dos cristais à matriz normalmente é de natureza mecânica, entretanto pode apresentar também caráter químico ou uma combinação destas. Obviamente, uma aderência ineficiente resultará numa inutilização precoce da ferramenta Zeren (2007).
- **Parâmetros do processo de fabricação:** além da composição química da matriz, a qualidade do produto final (pérola) também depende da temperatura de sinterização e do tempo do processo.

2.4. METALURGIA DO PÓ APLICADA NA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS

As ferramentas diamantadas conhecidas como impregnadas, 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 metalurgia do pó é um processo de fabricação de peças metálicas, que consiste basicamente na mistura dos pós da matriz e do reforço, seguidos da compactação (uniaxial ou isostática), para se obter uma pré-forma, que é o primeiro passo para a densificação do produto, seguida da sinterização, etapa em que se obtém a densidade final do produto, ou sob processos de conformação (Gordo *et al.*, 2000; Rao e Upadhyaya, 1998). O produto formado é chamado de produto sinterizado e pode ser submetido a uma série de operações complementares para obtenção do produto final.

O processamento convencional de metalurgia do pó consiste em três etapas básicas: mistura, compactação e sinterização. A Figura 9 mostra um fluxograma da rota convencional da metalurgia do pó e caracterização dos produtos sinterizados.

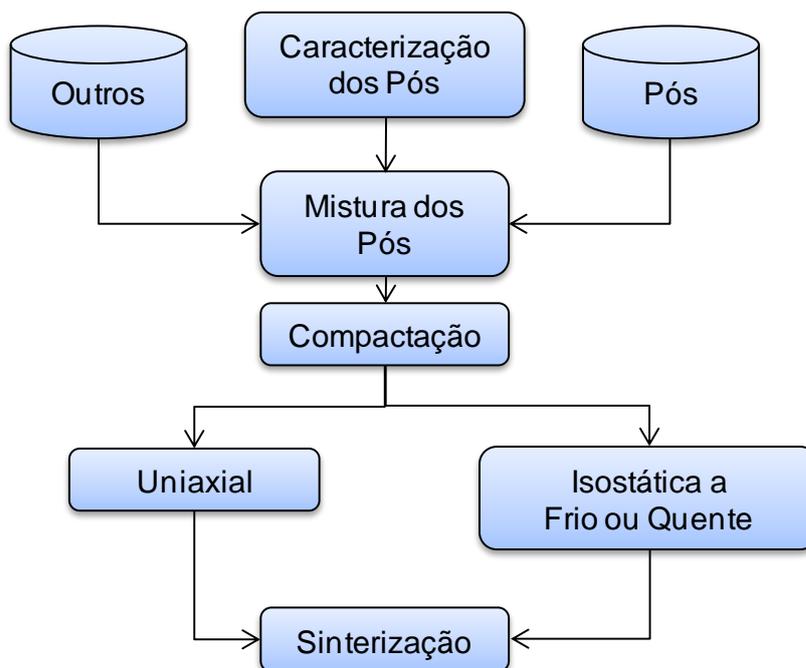


Figura 9. Fluxograma das etapas convencionais da metalurgia do pó.

2.4.1. Matriz

A matriz metálica tem basicamente duas funções: ancorar os diamantes e desgastar de forma controlada com o intuito de aflorar os diamantes para o corte. A retenção do diamante é realizada através de uma ancoragem mecânica, podendo ser auxiliada em alguns casos por uma ancoragem química. Contudo, a maioria das matrizes metálicas das ferramentas diamantadas atuais promove somente a ancoragem mecânica do diamante (Konstanty, 2005). A ancoragem química pode ser realizada através da utilização de uma liga que possua elementos formadores de carbetos ou do recobrimento de elementos reativos diretamente na superfície do diamante. Estes elementos formam uma interface que seguram firmemente o diamante na matriz metálica (Figura 10). Os principais elementos utilizados na liga como agentes formadores de carbetos são: o titânio, o silício e o cromo.

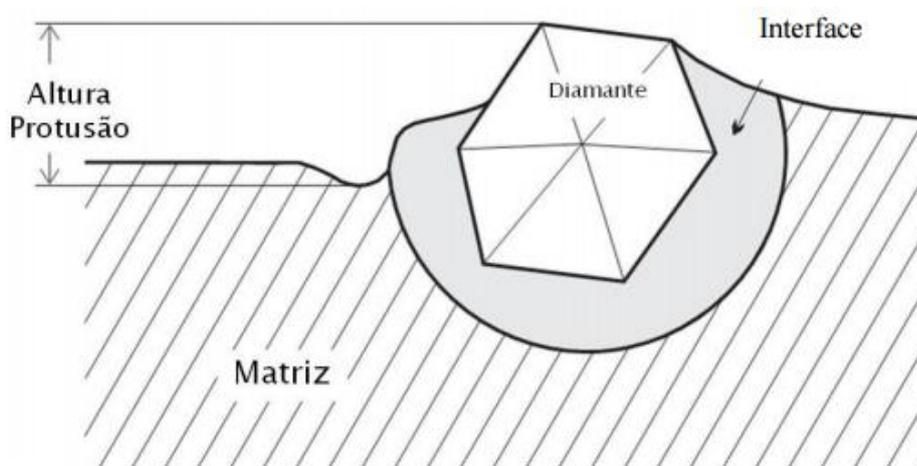


Figura 10. Altura de protusão e interface da matriz com o diamante (Konstanty, 2005)

A seleção do material da matriz depende da abrasividade e dureza do material a ser cortado. Por exemplo, para corte de materiais duros a matriz deve ser macia, por outro lado, para materiais macios a matriz deve ser dura (Almeida, 2012).

As propriedades da matriz devem ser ajustadas a fim de promover um desgaste gradual da matriz, garantindo uma protusão constante dos diamantes. Quando a matriz é mais mole do que o especificado, a altura de protusão dos diamantes aumenta e os diamantes são destacados antes do seu desgaste total. Em oposição, quando a matriz é muito dura, os diamantes não conseguem aflorar à superfície e, não havendo espaço para a condução do cavaco e do fluido de corte, o corte cessa. Diante disto, para atingir um bom rendimento das ferramentas diamantadas, o metal ligante deve ter boa compatibilidade química e mecânica com o diamante, sendo capaz de segurá-lo durante o corte (Artini *et al.*, 2011).

Segundo Konstanty (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.

A seleção dos ligantes depende fundamentalmente da abrasividade do material a ser cortado. Materiais que possuem dureza muito elevada, como o concreto, utiliza-se o tungstênio (W) como ligante. Se o material possuir alta dureza, como o granito, usa-se o Cobalto (Co), ou ligas a base de cobalto (W-Co). Se as

características do material apresentar dureza mais moderada, como o mármore, normalmente utiliza-se o Cobalto, Co-bronze, Fe-Co e Fe-bronze (Przyklenk, 1993).

2.4.1.1. Ligas de Cobalto

Devido à compatibilidade química do cobalto com o diamante nas temperaturas de processamento, resultando em uma boa retenção do diamante e uma excelente resistência ao desgaste após a operação de corte, o cobalto é utilizado por muitos anos no processo de fabricação de ferramentas diamantadas comerciais. Mesmo com estas características favoráveis a produção das ferramentas, o cobalto é extremamente tóxico (Shibuta, 1983; Del Villar *et al.*, 2001).

O cobalto é extraído de outros minerais, pois este metal em seu estado livre, não é encontrado na natureza, concebendo como subprodutos, minerais como o níquel e o cobre. Os maiores produtores de Cobalto são a China, Zâmbia, Rússia e Austrália, sendo que a sua disponibilidade no mercado nacional é baixa (Fonseca e Silva, 2010).

Ainda que o cobalto seja muito utilizado na produção de ligas metálicas, na forma de pó, é estabelecido uma manipulação cuidadosa, pois é inflamável e seu processo de decomposição ambiental é muito longo emitindo Raios Gama na natureza. A exposição ao Co-60 pode causar câncer, devido a sua radioatividade. Na ingestão ocorre o acúmulo de alguma quantidade nos tecidos, e é eliminado lentamente (Fonseca e Silva, 2010).

Estão sendo estudadas diferentes proporções de cobalto para a liga metálica, com a finalidade de reduzir o teor de cobalto utilizado em ferramentas diamantadas devido a sua toxicidade e disponibilidade no mercado (Clark e Kamphuis, 2002; Weber e Weiss, 2005)

2.4.2. Processamento

2.4.2.1. Preparação da mistura metálica + diamante

Consiste basicamente em misturar os pós selecionados de modo a conseguir uma composição química predeterminada e distribuição de tamanho, considerando a

aplicação do produto final.

A mistura uniforme proporciona uma mistura homogênea ao final do processo. Para melhorar essa homogeneização é adicionado agentes ligantes e lubrificantes, por exemplo, óleo de parafina, monoetileno glicol, etc. são muitas vezes adicionados ao pó nesta fase, em quantidades até 2% em peso, de modo a reduzir a poeira e evitar a segregação quando o pó é subsequentemente manipulado ou processado, mas também para minimizar o desgaste de matrizes de aço e reduzir óxidos durante as operações de prensagem a frio e a quente subsequentes, respectivamente (Konstanty, 2005).

2.4.2.2. Granulação dos Pós.

O processo de granulação é muito utilizado em indústrias. Pós muito finos são aglomerados para formar partículas maiores, ou grânulos os quais apresentam uma variedade de vantagens quando comparados com os pós muito finos; eles fluem melhor, apresentam menos riscos ambientais e dissolvem ou dispersam melhor (Reynolds *et al.*, 2005).

Ainda, o aumento do tamanho de pós por granulação melhora as estruturas macroscópicas e microscópicas, densidade e aparências das peças (Hassanpour *et al.*, 2009).

Granulação ocorre por colisão e aderência de partículas em grânulos discretos e/ou por crescimento a partir de um núcleo e formação de uma camada ao seu redor. As forças envolvidas durante o processo podem ser fornecidas por forças eletrostáticas ou de Van der Waals ou por ligações desenvolvidas através da sinterização, cristalização ou adicionando um ligante seco ou líquido (Hassanpour *et al.*, 2009).

O comportamento global de um sistema granular é governado pelas seguintes características: intrínsecas das partículas do material no estado sólido (tamanho, forma, porosidade, cristalinidade, etc.); propriedades das partículas (distribuição de tamanho de grão, homogeneidade, habilidade para segregar, etc.); propriedades macroscópicas dos pós em massa criada pela interação entre as próprias partículas ou entre as partículas e o ambiente ao seu redor (umidade, temperatura, etc.) (Traina *et al.*, 2013).

De acordo com estudos feitos por Bernardes (2006), existem algumas razões para realizar a granulação, dentre elas pode-se citar a prevenção da segregação dos componentes da mistura, a melhora na propriedade de fluidez da mistura dos pós e melhora na característica de compactação dos pós.

A ocorrência de segregação se dá devido a diferença no tamanho de partículas ou densidade dos componentes da mistura. Geralmente, partículas menores e/ou mais densas se concentram na base de um recipiente, sendo que as partículas maiores e/ou com menor densidade se concentram no topo desse mesmo recipiente (Bernardes, 2006).

Uma granulação ideal conterá todos os componentes da mistura na proporção correta em cada grânulo, dificultando a segregação dos ingredientes (Figura 11).

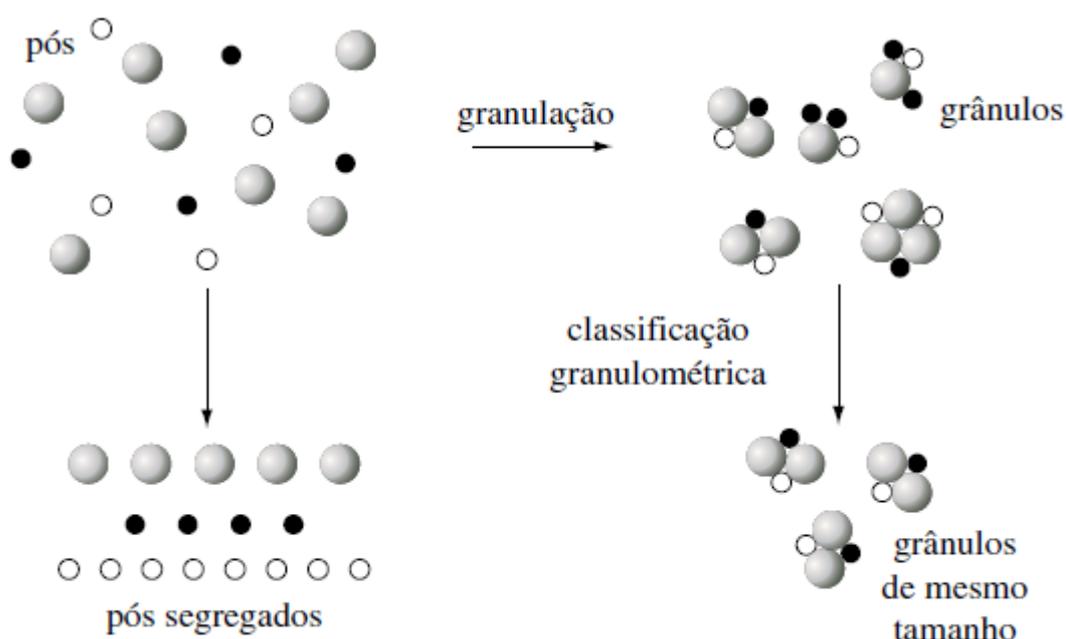


Figura 11. Granulação previne a segregação dos pós (Grantec Tecnologias Apud Bernardes, 2006).

Também é muito importante controlar a distribuição do tamanho dos grânulos, pois, embora os componentes individuais não apresentem segregação, se ocorrer uma larga distribuição granulométrica na massa granulada, pode ocorrer segregação (Bernardes, 2006).

Muitos pós não permitem uma boa fluidez, devido a sua forma irregular ou características de superfície e seu tamanho de grão pequeno, resultando em um gradiente de densidade do produto final indesejável. Assim, em determinadas faixas

de granulometria, a granulação da mistura define uma melhora significativa nas propriedades de fluidez dos materiais (Bernardes, 2006).

Mesmo com a adição de alguns ligantes na mistura, alguns pós apresentam dificuldades em compactar. Portanto, grânulos desses pós ou misturas desses pós são mais facilmente compactados resultando em peças mais resistentes. Bernardes (2006), ainda afirma que essa propriedade está associada com a distribuição do ligante dentro do grânulo e em função do método empregado para produzir o grânulo.

2.4.2.3. Compactação

Sendo considerada a primeira etapa da consolidação dos pós, apresenta como objetivos a conformação/compactação do pó na forma projetada e conferir as dimensões especificadas do produto, além de conferir ao compactado uma resistência e densidade verde necessária para manuseá-lo e efetuar posteriormente a sinterização de modo eficiente. O produto formado pela compactação é denominado de “compactado à verde” (Clapp, 1995; German, 1999).

Frequentemente utiliza-se a compactação dos pós para conformá-los em formas definidas. Esse processo envolve o rearranjo das partículas, seguido da sua deformação localizada, porém se o material for frágil, ocorre a fragmentação das partículas. Durante a compactação são formadas ligações entre partículas, as quais aumentam a resistência do material compactado (Clapp, 1995).

A compactação em materiais dúcteis provoca a deformação plástica nos pontos de contato, causada pela pressão concentrada nestes pontos de contato entre as partículas ultrapassando o limite de escoamento do material. Na medida em que a pressão aumenta, a zona de deformação se expande englobando toda a partícula, resultando no escoamento do material para as direções das regiões vizinhas conduzindo assim a densificação.

Durante a etapa de compactação ocorre a eliminação dos poros grandes e uma mudança na distribuição do tamanho de poros que tendem a reduzir de tamanho com a aplicação de pressão. Novos contatos são formados na medida que o centro das partículas se aproximam, ao mesmo tempo ocorre a densificação do material conformado (German, 1999). Este esquema está representado na Figura 12.

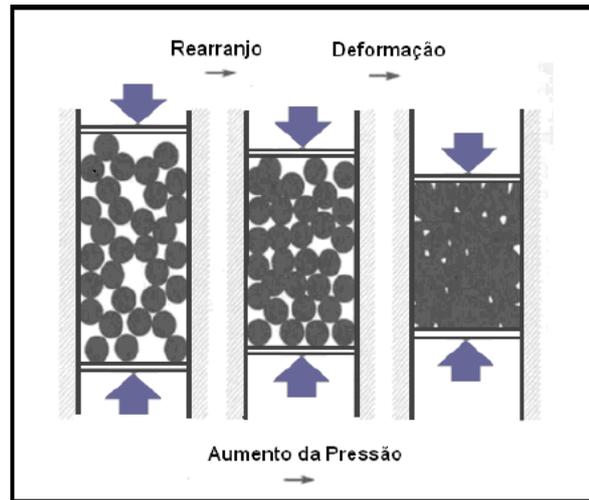


Figura 12. Estágios da movimentação das partículas na cavidade de uma matriz durante o processo de compactação (German, 1999).

A compactação é a principal etapa de densificação nos pós dúcteis, já nos materiais duros a sinterização é a principal etapa de densificação. Assim os materiais com elevada dureza necessita de uma maior sinterabilidade. Essa é diferença no comportamento entre os pós duros e dúcteis, durante a etapa de compactação como pode ser observada na Figura 13, onde é observado que os pós dúcteis apresenta maior densidade relativa para mesma pressão de compactação, quando comparadas com os pós duros. Para materiais dúcteis, consegue-se a densificação final (aproximadamente 100%) apenas com o processo de compactação. Para pós duros, na etapa de compactação é obtido uma densificação final de aproximadamente 60%, necessitando de uma outra etapa a fim de obter a densidade final do produto (Galiotto, 2005).

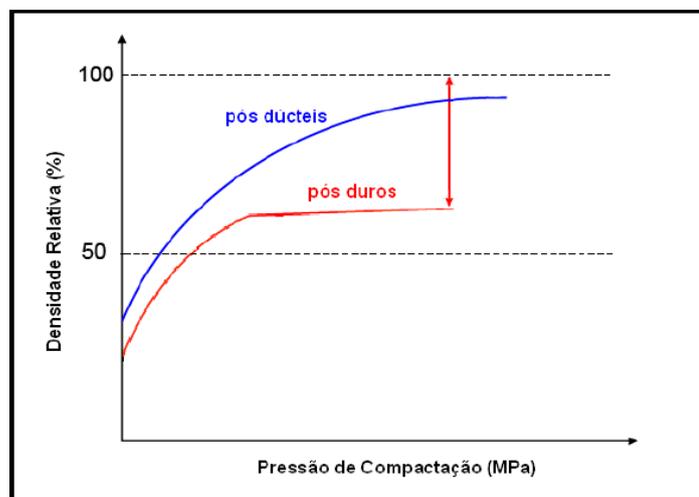


Figura 13. Comparação da densificação entre os pós dúcteis e duros (Galiotto, 2005).

O mecanismo de densificação é dependente das características das partículas e do material, que inclui a dureza, limite de resistência, deformação, tenacidade à fratura, tamanho e forma da partícula. Tanto o tamanho quanto a forma da partícula controlam a fricção entre as partículas, a densidade de empacotamento e o tamanho do poro. Partículas maiores dão origem a uma maior densidade de empacotamento inicial do pó solto e exibem mais altas densidades para todas as pressões de compactação. As partículas menores são mais difíceis de serem compactadas devido ao maior número de pontos de contato, maior taxa de deformação, maior concentração de tensões nos poros pequenos e maior quantidade de zonas de deformação. Dessa forma, a densificação ocorre mais facilmente com partículas grandes. Uma distribuição de partículas ampla, também aumenta a densificação para qualquer pressão de compactação (German, 1999).

A forma da partícula tem um grande efeito na densidade de empacotamento inicial e na fase de rearranjo das partículas. Para partículas esféricas, a contribuição na densificação durante a fase de rearranjo é relativamente pequena e isotrópica. Para partículas irregulares ocorre um rearranjo considerável em baixas pressões de compactação. Partículas com porosidade interna e os aglomerados de partículas são difíceis de compactar. Essas partículas exibem dois estágios de compactação. O primeiro estágio envolve o colapso dos poros grandes entre as partículas, enquanto que o estágio com pressões mais altas envolve a eliminação dos poros dentro das partículas. Consequentemente, as partículas porosas e os aglomerados exibem alta compressibilidade inicial, mas resistem a compactação a altas pressões (German, 1999).

As formas de compactação podem ser divididas em dois grupos, discriminados a seguir.

1 – Consolidação direta de pós – processos de compactação uniaxial, compactação isostática, extrusão de pós e laminação de pós;

2 – Consolidação de compactados pré-conformados – processos de forjamento, laminação e extrusão.

O tipo clássico de compactação utilizado em larga escala industrial é do tipo uniaxial, com pressão aplicada em matriz rígida de forma unidirecional. As prensas empregadas nessa operação são geralmente do tipo mecânico ou hidráulico. Os pós não respondem de maneira uniforme a esse tipo de aplicação de pressão e o atrito

das partículas com as paredes da matriz induz gradientes de densidade durante a compactação (German, 1999).

A técnica de compactação isostática a frio consiste na conformação do pó através da aplicação de pressão hidrostática, isto é, aplicada simultaneamente e com a mesma intensidade em todas as direções. Porém, vem apresentando um crescimento industrial significativo, principalmente devido as seguintes vantagens com relação à compactação uniaxial: propriedades uniformes em todas as direções, produção de formas inviáveis através de compactação isostática, redução das tensões internas devido a gradientes de densidade, alta resistência a verde, baixo custo do molde e do equipamento (Jackson, 1967).

2.4.2.4. Sinterização

A sinterização é um tratamento térmico ao corpo compactado em que a temperatura varia de acordo com os componentes do pó inicial e dos processamentos anteriores a esta etapa. O tratamento consiste em aquecer o compactado à verde em uma temperatura inferior a do ponto de fusão do principal constituinte, em condições controladas de tempo e atmosfera. Durante essa etapa as partículas que constituem o compactado ligam-se entre si formando um corpo mais denso e ocorrem várias reações, a maioria no estado sólido. A utilização de atmosferas protetoras é fundamental na sinterização de pós metálicos e tem a finalidade de prevenir ou minimizar reações químicas entre o compactado a verde, como a oxidação, remover as impurezas presentes, além da possibilidade de fornecer um ou mais elementos químicos para se combinarem com os pós na forma de compactado à verde (German, 1996).

Na sinterização as partículas do corpo compactado se ligam formando uma sólida estrutura. Nesta etapa, a formação de contornos de grãos e o crescimento de pescoços de união interpartículas ocorrem por mecanismos de transporte de matéria, normalmente processos difusionais atômicos ativados termicamente, em temperaturas abaixo do ponto de fusão preenchendo a região de contato interpartículas (poros) (German, 1996).

O objetivo principal da sinterização é realizar uma forte união entre as partículas do pó inicial, por ativação térmica. O processo de sinterização ocorre (caso contrário seria fusão simples) em temperaturas abaixo do ponto de fusão do

material, através do transporte de átomos por difusão. Este processo é denominado sinterização via fase sólida ou sinterização no estado sólido.

2.4.2.4.1. Sinterização Convencional

É a técnica de sinterização mais simples utilizada pela metalurgia do pó, a qual se controla a atmosfera para a extração de ligantes de sinterização (geralmente utiliza-se uma mistura de gases) e fixa-se uma taxa de aquecimento.

A estrutura sinteriza apenas com o auxílio da temperatura. Geralmente, trabalha-se com baixas taxas de aquecimento e resfriamento, devido a inércia térmica dos fornos. Os fornos resistivos são os de mais fácil fabricação e permitem o processamento de uma maior quantidade de amostras por batelada (Moro e Auras, 2007).

Os fornos para sinterização podem ser a gás ou elétricos, por resistência ou indução (fornos a vácuo geralmente). Nos fornos a resistência, os elementos de aquecimento (fios ou barras) são de Ni-Cr para temperatura até 1150 °C, de SiC até temperatura da ordem de 1400 °C, de molibdênio ou tungstênio, até temperatura da ordem de 1550 °C (neste caso, exigindo a atmosfera protetora redutora de hidrogênio). Os fornos de sinterização trabalham normalmente com atmosfera protetora com objetivo de evitar a oxidação das peças e reduzir os eventuais óxidos contidos nos pós e que poderiam prejudicar o grau de sinterização (Fernandes, 2014).

Na Figura 14 pode ser visto um forno típico utilizado na metalurgia do pó. São normalmente do tipo contínuo, com esteira, com empurradores ou com vigas movediças (Chiaverini, 1986). Este processo de sinterização é constituído por três etapas. No primeiro estágio ocorre a 'remoção de aglomerante', onde são removidos o lubrificante utilizados na etapa de compactação. O segundo estágio é caracterizado pelo aquecimento que prolonga-se até a temperatura de sinterização. O terceiro e último estágio, onde é atingido o patamar de sinterização, é caracterizado pela permanência na temperatura de sinterização, na qual é atingida a densificação total (Allibert, 2001).

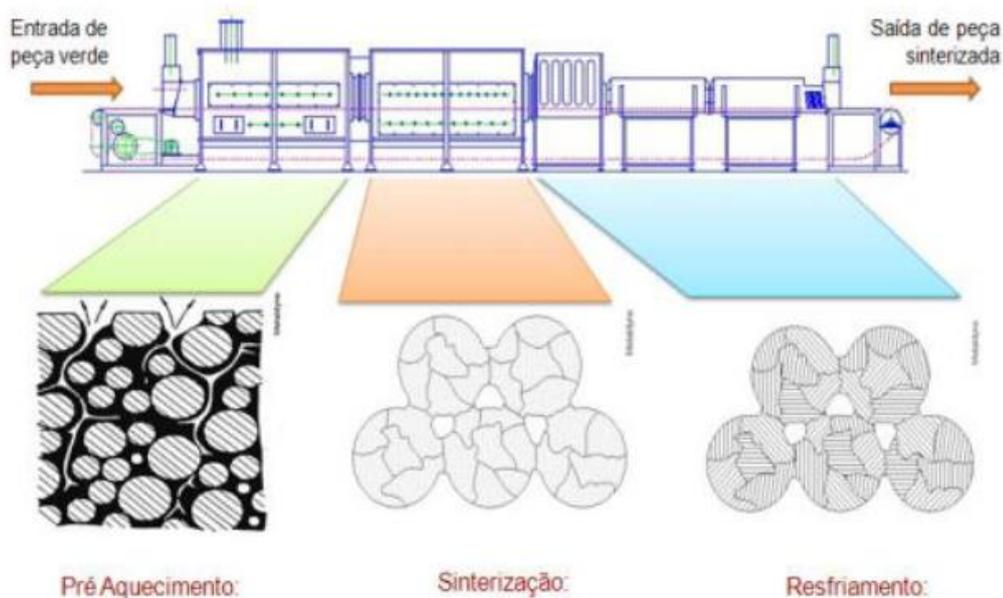


Figura 14. Etapas do processo de sinterização convencional (Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009).

Os objetivos de se controlar a atmosfera interna do forno durante a etapa de sinterização são: impedir a entrada de ar no forno prevenindo e minimizando as possíveis reações químicas entre o compactado verde e os gases da atmosfera; evitar a oxidação; remover impurezas superficiais e internas existentes; e eventualmente, fornecer elemento químico a amostra sinterizada (Knewitz, 2009).

2.4.2.4.2. Hot Press (Sinterização assistida por Pressão)

Nesta técnica, dois fatores promotores de sinterização são usados simultaneamente: temperatura e pressão. A temperatura promove o aumento de transporte de material. A pressão intensifica ainda mais este transporte, por deformação plástica e deslizamento de partículas inteiras. Este método é recomendado quando se deseja sinterizar materiais que são dificilmente sinterizados somente por aquecimento, como as cerâmicas covalentes, ou quando se quer garantir o fechamento completo da porosidade de estruturas usualmente sinterizadas apenas por aquecimento.

(a) Sinterização via estado sólido

Basicamente, a sinterização via estado sólido, é um processo em que ocorre ligação química e metalúrgica das partículas do pó no sentido de eliminar ou diminuir a porosidade existente no compactado verde, formando um corpo coerente provido das propriedades físicas primárias de sinterizado.

Na sinterização em fase sólida os mecanismos de transferência de massa são: difusão da superfície, difusão do volume, difusão do contorno de grão, escoamento viscoso, escoamento plástico e transporte de vapor através das superfícies sólidas. O processo de sinterização no estado sólido pode ser dividido em três estágios Figura 15: O primeiro estágio ocorre durante o aquecimento, quando as partículas que estão em contato formam ligações fracas entre si. Dependendo da compactação dos pós, uma faixa inicial de ligações surge a partir do ponto de contato até as interfaces amplamente deformadas do material. Dessa forma, o estágio inicial de sinterização é caracterizado pela formação de contatos entre as partículas do pó compactado, pela ativação dos mecanismos de transporte de massa promovendo a formação e o crescimento de conexões (“pescoços”), até o ponto onde eles começam a interferir entre si. Como consequência, há diminuição dos tamanhos dos poros intercomunicantes (redução da área superficial de poros) e aumento da interface entre as partículas (German, 1996). No segundo estágio ocorre o arredondamento dos poros e as partículas discretas são menos evidentes, como pode observado na Figura 15. Este estágio é caracterizado pela densificação do compacto e pelo decréscimo dos diâmetros dos poros interligados. Há o alargamento dos pescoços, canais de poros são fechados e os poros se tendem a se tornar esféricos. A intercomunicação entre os poros praticamente desaparece. No estágio final de sinterização ocorre contração dos poros, que se tornam esféricos e perdem o contato com a superfície do compactado, sendo denominados poros fechados. Como os poros abertos são mais efetivos no retardamento do crescimento dos grãos, por produzirem maior fixação dos contornos de grão, na fase final de sinterização ocorre um rápido crescimento dos grãos, que se mantém mesmo quando a densidade total do compactado é atingida (German, 1996).

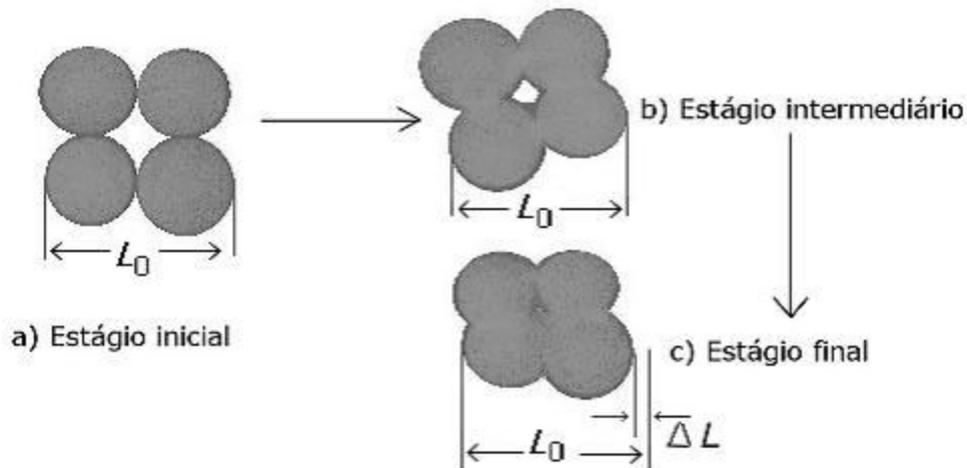


Figura 15. Representações esquemáticas dos três estágios de sinterização e a consequente retração linear durante as etapas de sinterização (Ring, 1996).

(b) Sinterização Via Estado Líquido

A sinterização em fase líquida é caracterizada por aparecer uma fase líquida entre determinada temperatura de sinterização. Existem três estágios: estágio de rearranjo ou fluxo líquido, o qual é marcado inicialmente pelo espalhamento do líquido recém formado ao redor das partículas sólidas que conduzem ao rearranjo dessas partículas e a densificação da estrutura. O estágio de solução-precipitação, onde só ocorrerá se houver solubilidade da fase no líquido. E por fim, o estágio de sinterização em estado sólido onde só ocorre se a estrutura ainda não estiver completamente densa e consiste no crescimento de pescoço entre as partes sólidas que estão em contato. Sua finalidade é o encerramento do processo de fechamento dos poros e a contração da estrutura (Chiaverini, 2001). A Figura 16 mostra um exemplo das fases de sinterização em fase líquida.

Segundo Konstanty (2003) a sinterização em fase líquida sob alta pressão e alta temperatura é o processo de densificação usado na produção de materiais que possuem características que dificultam o processo de densificação no estado sólido, é realizada com o intuito de obter-se a máxima densidade, com pouca porosidade residual. Esta técnica pode levar a obtenção de estruturas quase ou totalmente densas em um intervalo de tempo curto, conferindo ao material sinterizado excelentes propriedades mecânicas.

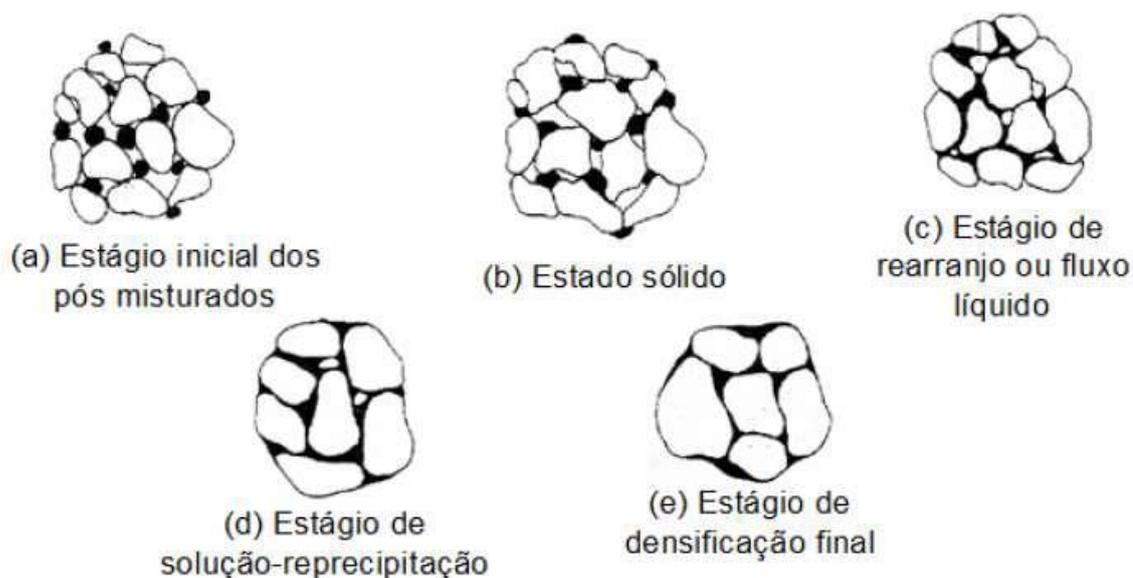


Figura 16. Estágios da Sinterização em fase líquida (German, 1985).

2.4.2.4.3. Sinterização por Infiltração

Este método de sinterização de compósito diamantado permite a utilização de valores moderados de pressão e temperatura. Os grãos de diamante são compactados a altas pressões (6-7 GPa) e temperaturas moderadamente altas (1400° - 1600°C). No início desse processo, a pressão se distribui na massa de grãos de forma altamente desigual, ou seja, este estágio é caracterizado pela existência de um gradiente de pressão no volume da amostra. A carga aplicada é suportada por pontos de contato direto entre os grãos adjacentes.

A compactação se consuma graças à fusão de uma segunda fase (fase responsável pela ligação entre os grãos). Esta fase fundida se infiltra na rede contínua de canais entre os grãos de diamante (microporos e microtrincas). A temperatura de fusão do aglomerante não deve ser muito alta a fim de se evitar a grafitização do diamante (Nunes, 2006 apud Horton *et al.*, 1974).

O aglomerante fundido, no decorrer de seu processo de penetração entre os grãos de diamante pode provocar grafitização parcial do diamante, se dissolver ou reagir com o carbono formando carbetos (formação do esqueleto ou carcaça a base de carbetos). Os carbetos formados levam à redução das dimensões dos canais entre os grãos o que dificulta o acesso posterior do aglomerante líquido.

A Figura 17 mostra um esquema de sinterização com infiltração, onde o espaço poroso de um pó (sinterizado) de estrutura porosa foi cheio com a fase em fusão e ligado a uma temperatura entre os pontos de fusão dos dois materiais.

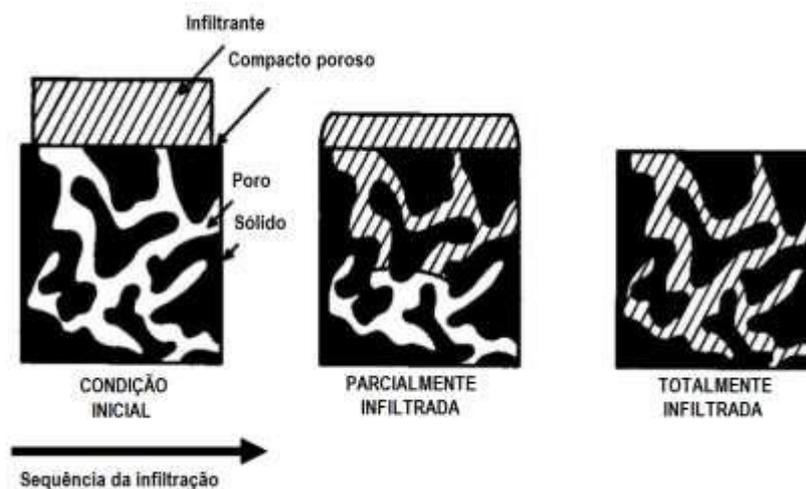


Figura 17. Modelo esquemático da sinterização com infiltração de um determinado pó. (Gordeev *et al.*,2004).

Os principais estágios deste processo são a densificação do arranjo das partículas de diamante e fragmentação parcial de seus grãos sob pressão aplicada, deformação plástica dos grãos de diamante sob pressão aplicada a frio e depois por aquecimento, fusão da segunda fase (aglomerante) e subsequente penetração através do esqueleto da matriz de diamante e a reação entre a fase líquida e o diamante.

Nunes (2006) apud Horton *et al.* (1974) comenta que o requisito mais importante para que este processo aconteça em condições favoráveis, é a existência de uma rede contínua de poros através do volume da matriz de diamante, visto que a penetração é restringida pelo fechamento dos poros abertos, no decorrer da reação diamante-fase líquida. A aplicação de alta pressão gera uma força suficientemente alta para forçar os diamantes para posições tais que propiciam a formação de uma rede contínua e estável. Isto poderia explicar a alta resistência à compressão dos compactos. Como há uma alta densificação do arranjo de grãos, o teor de ligante é minimizado.

2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MATRIZ

Uma das exigências mais importantes da matriz é segurar firmemente as partículas de diamante. Para controlar a capacidade da matriz em reter o diamante é necessário conhecer algumas características importantes, como, dureza, resistência a flexão e resistência ao desgaste (de Châlus, 1994).

2.5.1. Dureza

A dureza é um parâmetro de controle de qualidade do segmento diamantado. A Figura 18 mostra a relação entre a dureza da matriz e a sua temperatura de consolidação.

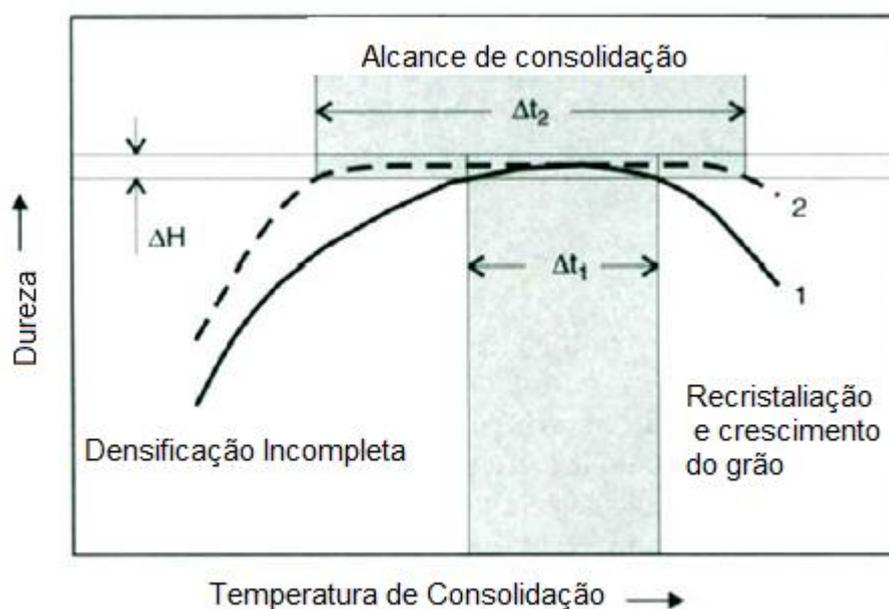


Figura 18. Curvas da variação de dureza em função da temperatura de consolidação da matriz (Pacheco *et al.*, 2007).

Pode-se observar que as grandezas de dureza e temperatura de consolidação variam de forma proporcional. Na curva 1 é verificado o comportamento real de matriz sinterizada com variação de temperatura (Δt_1). O comportamento ideal da matriz é representado pela curva 2, observando uma maior variação de temperatura de consolidação (Δt_2) quando comparado com a curva 1. Tanto para a curva 1 quanto para a curva 2, a partir de um valor máximo de dureza alcançado, seu valor começa a cair na medida em que a temperatura cai, devido a

ocorrência de outros processos concorrentes como recristalização e crescimento de grãos. Assim, para a fabricação da ferramenta é desejável que a matriz exiba uma variação de dureza (ΔH) uniforme durante a variação de temperatura de consolidação (Pacheco *et al.*, 2007).

Uma matriz bem densificada adquire uma estreita faixa ideal de dureza que é afetada pela sua composição e os parâmetros do processo através da consolidação dos pós. Se uma densificação incompleta estiver presente ou um tratamento deficiente da mistura que compõe o segmento, as medidas de dureza não se enquadrarão no intervalo especificado (Pacheco *et al.*, 2007).

Segundo Johnson (2005), o endurecimento por formação de solução sólida de cobre em ferro, promove o aumento de algumas propriedades mecânicas, tais como, resistência a tração e a dureza, aos quais podem ser acrescidas de até 40% em comparação ao cobre e ferros puro.

2.5.3. Resistência ao Desgaste

O desgaste a ferramenta é a planificação ou embotamento das partículas abrasivas (abaulamento). O desgaste da matriz ligante diminui a área em que a partícula abrasiva é sustentada sobre a matriz. As partículas começam a se desprender quando é atingido o ponto crítico de desgaste da matriz, e então surge uma nova camada de partículas abrasivas. O desprendimento destas partículas para o aparecimento de uma nova camada é conhecido como protusão ou “pull out” (Azeredo, 2002).

O efeito combinado de todos os diamantes na superfície da ferramenta define a vida útil e a eficiência de corte da ferramenta diamantada. Já o desempenho destas ferramentas é influenciado pela resistência, tamanho e estrutura dos cristais de diamante (Almeida, 2012).

Sendo assim, as características da progressão de desgaste destes diamantes são dependentes das propriedades das partículas abrasivas e das condições sobre o qual a ferramenta está trabalhando.

Segundo a Element Six Ltda (2003), a progressão do desgaste é dividida em três regimes distintos, mostrado nas micrografias apresentadas na Figura 19:

1 – No primeiro estágio, o cristal de diamante ainda não possui altura de protusão suficiente para realizar o corte do material, pois as partículas ainda estão emergidas e conseqüentemente não há desgaste diamante (Figura 19 (a)).

2 – O segundo regime é representado pela Figura 19 (b) e 19 (c), com o desgaste da matriz, o cristal de diamante atinge uma altura de protusão suficiente para o contato com o material de corte, ocasionando o desgaste plano.

3 – O terceiro regime é observado pela Figura 19 (d). O resultado das partículas fraturadas e quebradas é proveniente da constante rotação da ferramenta, causando carregamentos cíclicos, devido às vibrações do equipamento e irregularidades da peça cortada.

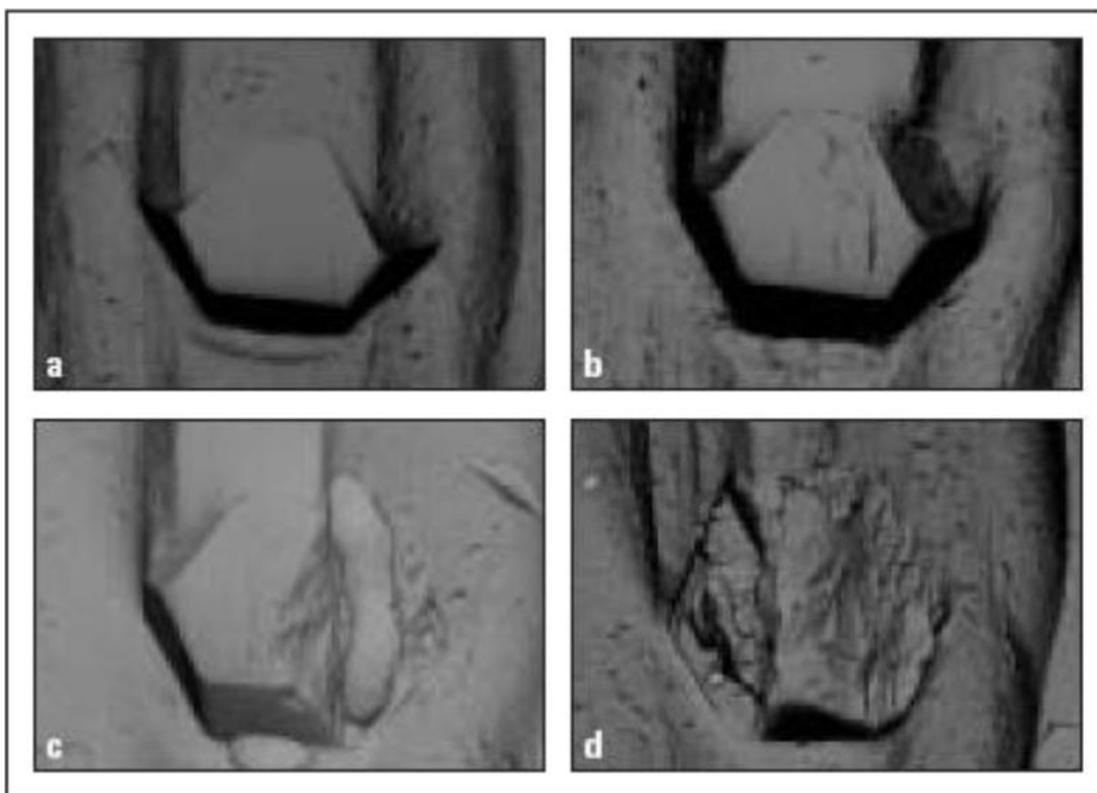


Figura 19. Micrografia que mostra a progressão de desgaste dos diamantes – a) partícula emergida, b) desgaste plano, c) desgaste plano e rugoso e d) desgaste rugoso (Element Six Ltda, 2003).

É necessário destacar que não ocorre uma mudança abrupta de um estágio para outro, mas sim uma transição gradual entre eles.

De acordo com Tolkowsky (1920), o processo de desgaste do diamante é constituído por lascas de fragmentos pequenos e a superfície resultante é dotada de

asperezas. Wilks J. e Wilks E. (1979) afirmam que a taxa de desgaste não aumenta com a temperatura, mas depende da direção de abrasão.

A Figura 20 apresenta um gráfico relacionando a taxa de desgaste, em porcentagem, obtido pelas alturas individuais dos cristais de diamante durante a progressão do desgaste. Percebe-se que há aproximadamente 20% de redução de altura para o modo de desgaste plano e para o rugoso 30%. Nota-se que altura do cristal decresce linearmente até o início do campo rugoso, onde ocorre a fratura dos cristais, e em seguida o processo de corte é interrompido.

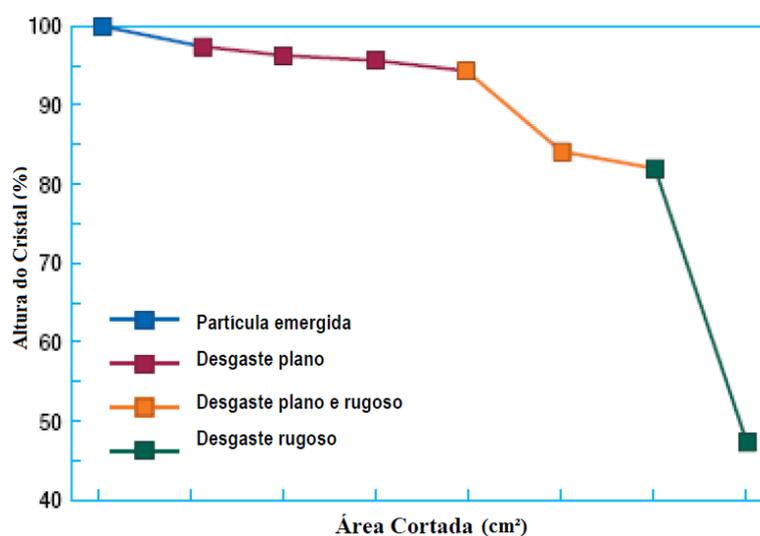


Figura 20. Variação da taxa de desgaste linear durante progressão de desgaste dos diamantes (Element Six Ltda, 2003).

A taxa de desgaste apresentada na Figura 20 pode ser mostrado através da distribuição do modo de desgaste dos cristais de diamante na Figura 21. No estágio em que se a partícula de diamante se encontra emergida e o estágio em que há desgaste totalmente rugoso, não há desgaste das partículas de diamante. Portanto a vida útil da ferramenta é determinada pelos estágios de desgaste plano e desgaste plano rugoso. Vale ressaltar que não há uma variação brusca do desgaste plano para o rugoso, e sim uma transição entre os estágios.

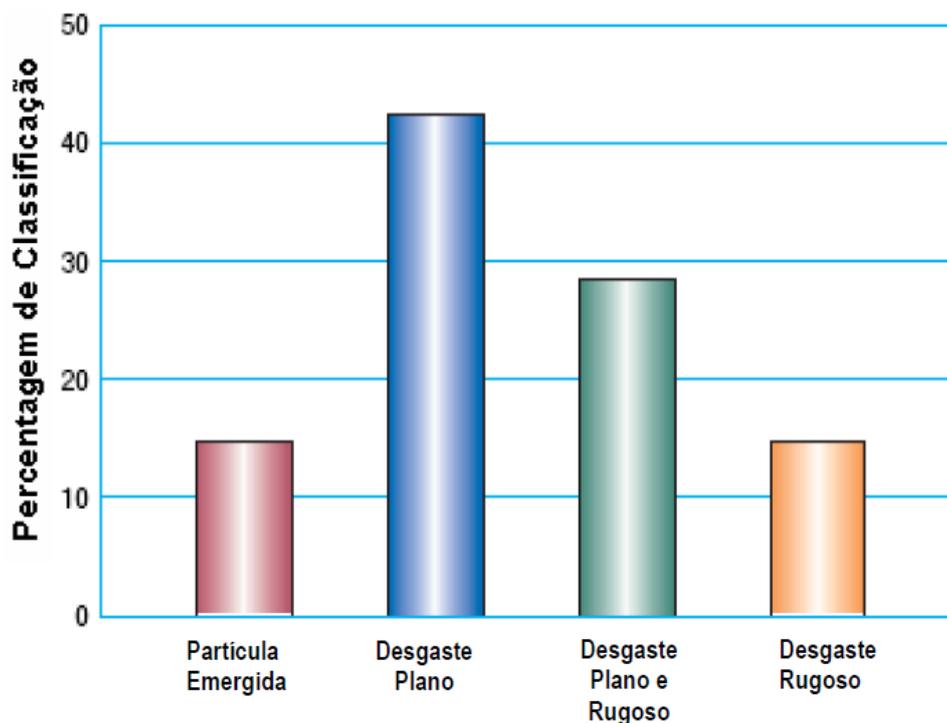


Figura 21. Distribuição da classificação do modo de desgaste das partículas de diamantes durante progressão de desgaste dos diamantes (Element Six Ltda, 2003).

A Figura 22 mostra os resultados obtidos durante a verificação do desempenho da ferramenta e as taxas de desgaste em diferentes condições. Observa-se, no gráfico, que a medida que a taxa de corte aumenta, o desgaste radial também aumenta, pois as condições de corte se tornam mais severas.

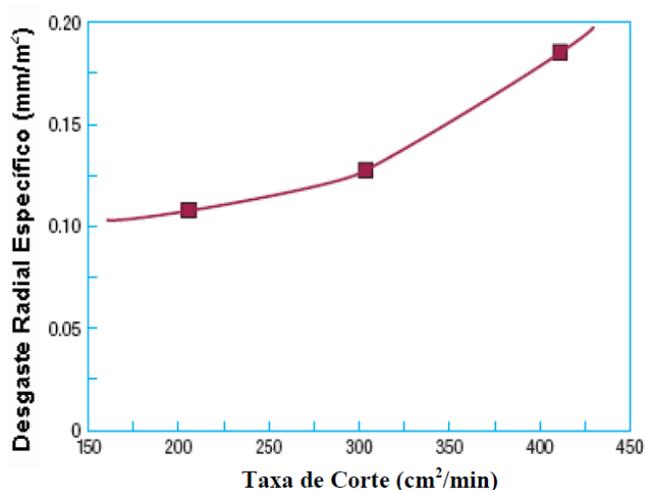


Figura 22. Efeito da taxa de corte no desempenho da ferramenta (Element Six Ltda, 2003).

2.6. FIO DIAMANTADO

O fio diamantado é constituído geralmente por um cabo de aço inox, sobre o qual é inserida as pérolas diamantadas regularmente espaçadas por anéis de borracha ou molas espaçadoras, que funciona como abrasivo para o corte de rochas (Regadas, 2006; Gotardo, 2008). Este fio constitui a ferramenta de corte, cuja configuração é definida considerando o tipo de rocha a cortar e a própria operação de corte a realizar.

2.6.1. Cabo de aço

Os cabos de aço são constituídos por três componentes estruturais básicos: o núcleo, os filamentos e o arame (Figura 23). Por norma, os arames são enrolados helicoidalmente em torno do arame que se situa no centro do filamento (núcleo do filamento) formando assim o próprio filamento. Em seguida os filamentos são enrolados helicoidalmente em torno do núcleo, concebendo o cabo de aço.

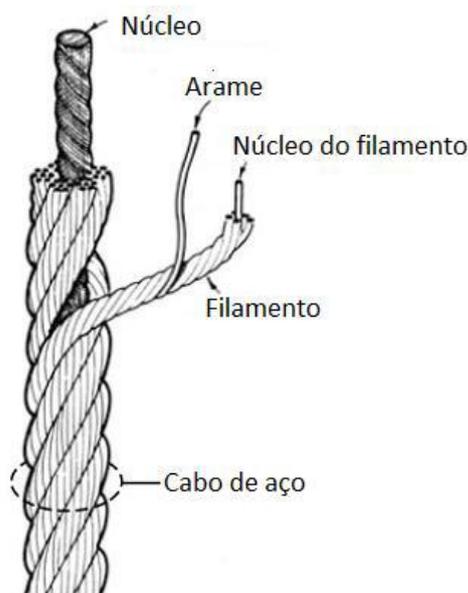


Figura 23. Composição do cabo de aço.

Atualmente são produzidos cabos de aço com diversas configurações relativas aos filamentos, especificamente em relação à quantidade, disposição e tipo de enrolamento destes em torno do núcleo. Existe também uma grande diversidade

de materiais usados nos componentes que constituem o cabo de aço (U.S. Navy DTI Wire-Rope Handbook, 1987).

Contudo, em toda a bibliografia estudada, não foi encontrada qualquer informação específica referente aos cabos de aço utilizados no fabrico de fio diamantado, visto que trata-se de um Know-how das empresas fabricantes. Além disso, não foram encontradas normas padronizadas para as tensões que devem ser suportadas pelos cabos para os diferentes tipos de aplicações como fio diamantado: monifio ou para teares, as quais são específicas de cada fabricante.

2.6.2. Pérolas Diamantadas

As pérolas diamantadas são constituídas por um anel metálico (aço galvanizado), revestido por uma camada diamantada (anel de corte). Existem dois processos em que a camada diamantada é depositada no anel metálico, o processo de deposição eletrolítica e a sinterização. A sinterização das pérolas diamantadas (Figura 24(a)) tem característica de maior durabilidade e aplicabilidade ao corte de diferentes tipos de rochas, além de terem um custo operacional inferior quando comparado as pérolas eletrolíticas. Na produção do fio diamantado por deposição eletrolítica (Figura 24(b)), a camada diamantada é depositadas por eletrolise, através do processo de galvanização (Cabral *et al.*, 2011).



Figura 24. (a) Pérola Sinterizada; (b) Pérola Eletrolítica (Diamant Boart, 2008).

Na Figura 25 mostra a seção transversal da pérola montada no cabo de aço.

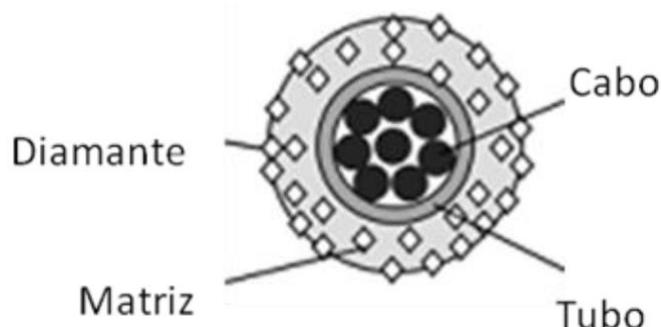


Figura 25. Pérola diamantada produzida por metalurgia do pó (Tonshoff e Apmann, 2002).

2.6.3. Revestimento do Fio diamantado

As pérolas diamantadas são espaçadas regularmente sobre o cabo de aço em função do tipo de fio a ser produzido: monofio ou teares. Nesta tese só foi tratado o revestimento de fio para teares, aos quais são plastificados. As configurações possíveis utilizadas atualmente podem ser observado de acordo com a Figura 26: molas metálicas (Figura 26(a)), revestimento de material plástico (Figura 26(b)) ou de borracha (Figura 26(c)). Estes sistemas de separação das pérolas diamantadas constituem também um revestimento de proteção do cabo.



Figura 26. Fio diamantado revestido (a) com molas metálicas, (b) em plástico, (c) em borracha (Diamant Boart, 2008).

O espaçamento entre as pérolas depende do molde utilizado na plastificadora, normalmente são colocados de 35 a 40 pérolas por metro linear de fio (informação fornecida pela GT Wire).

A vantagem do revestimento do fio diamantado é a proteção do cabo de aço das lamelas de corte, prevenindo assim a oxidação do mesmo, a qual poderia resultar no rompimento prematuro do fio. A Figura 27 mostra o molde de espaçamento das

pérolas diamantadas e introdução do revestimento para plastificação do fio. A injeção do polímero é feita através da parte superior do equipamento, a qual não é mostrada no equipamento.



Figura 27. Molde de injeção do revestimento no fio diamantado (Steinvarz, 2005 apud Regadas, 2006).

O revestimento do cabo de aço é de muito importante para o fio diamantado. Uma vez que, ele auxilia na condução dos cavacos gerados no corte, protege o cabo de aço contra o desgaste e a corrosão e atua como meio fixador da pérola diamantada no cabo de aço. Para cada rocha a ser cortada, varia o material a ser utilizado no revestimento. Basicamente, existe dois tipos de revestimento, o plástico ou borracha. O plástico é utilizado para corte de mármore e granitos. Já o revestimento de borracha é mais flexível, e por isso, reduz a ovalização da ferramenta, e pode ser utilizado para o corte de rochas duras, como granito e arenito, sendo mais adequado para máquinas monofio (Diamant boart, 2008).

A utilização de molas metálicas garantem o espaçamento entre as pérolas diamantadas. Esse tipo de mola geralmente é empregado para o corte de rochas menos duras. O uso da mola metálica apresenta risco no uso, pois caso de rompimento do cabo, as pérolas podem ser perdidas ao longo da região de corte ou até mesmo serem arremessados causando acidente de trabalho. Com a perda das pérolas ao longo da região de corte, impede a colocação de um novo fio no mesmo (Machado, 2009).

2.6.4. Processo de Corte com Fio Diamantado

O corte com fio diamantado é uma das tecnologias mais recente utilizada na serragem de blocos e ainda encontra-se em processo de avanços em seu desempenho, uma vez que sempre se utilizou o corte por teares com lâminas de ferro e lama abrasiva.

Segundo Alencar *et al.*, (1996), o processo de corte com o fio ocorre pela ação abrasiva dos anéis ou pérolas com diamante, dispostos ao longo do fio. Este funciona como uma espécie de serra-fita que gira a determinada velocidade e é tensionada sobre o bloco. O fio, em contato tensionado contra o bloco e girando a alta velocidade de translação, circula conduzindo e tensionando por um sistema de polias sendo acionado por um motor elétrico.

A evolução dessa tecnologia fez surgir nos últimos anos modelos de máquinas multifio diamantado para desdobramento de blocos com a utilização de um sistema multipolias, podendo cortar diversas chapas de rocha ornamental ao mesmo tempo (Figura 28).



Figura 28. (a) Máquina multifio diamantado; (b) Execução do corte com máquina de multifio diamantado (Cimef Metalúrgica, 2015).

A máquina de corte com fio diamantado ou multifio, como também conhecido, constitui-se basicamente por um conjunto de polias que, acionadas por um motor, imprimem determinada velocidade e tensionamento ao fio, montado ou instalado em circuito fechado em torno deste conjunto de polias (Alencar *et al.*, 1996).

2.6.4.1. Mecanismo de desgaste durante o corte com fio diamantado

O fio diamantado pode ser utilizado em todas as fases do desmonte de rochas, seja ele primário ou secundário, e no esquadrejamento de blocos. O desmonte primário consiste no isolamento de grandes porções de rochas do maciço, conhecidos como quadrotos. Os quadrotos são divididos em filões, o que configura o corte secundário. Os filões são denominados de pranchas e são divididos em blocos de tamanho comercial (esquadrejamento).

O princípio de corte do fio diamantado, envolve o ciclo contínuo de um cabo de aço envolvido com pérolas diamantadas através da rocha para proporcionar a ação do corte (Figura 29). Através da força de tração constante sobre o fio, um caminho é cortado através da rocha. Em pedreiras, o passo inicial para fazer um corte vertical é fazer dois furos, um vertical e um horizontal, que se cruzam em um ângulo de 90°. O fio diamantado é então introduzido através desses furos, montado em torno da roda de acionamento, as duas extremidades são fixadas em conjunto para formar um laço contínuo. A roda de acionamento pode ser fixado em qualquer ângulo, da vertical para horizontal.

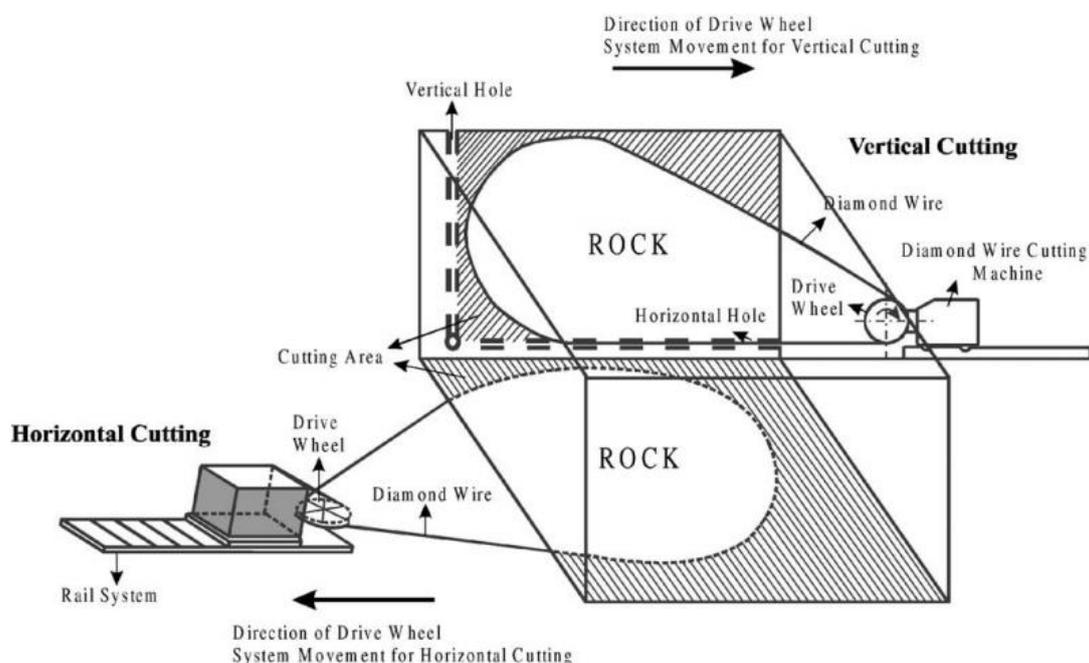


Figura 29. Fio diamantado durante a operação de corte (Ozcelik, *et al.*, 2002).

No processo de corte com fio diamantado, os grãos de diamante e a matriz metálica sinterizados na forma de pérolas, em semelhança com a serra circular, em

contato com a superfície do material é capaz de fazer moagem, corte ou desgastar por abrasão de acordo com o ângulo de contato (Ozcelik *et al.*, 2002).

Durante o corte da rocha com fio diamantado, ângulo de contato entre a pérola e a superfície da rocha varia de acordo com a trajetória do cabo instalado na máquina, conforme visto na Figura 30.

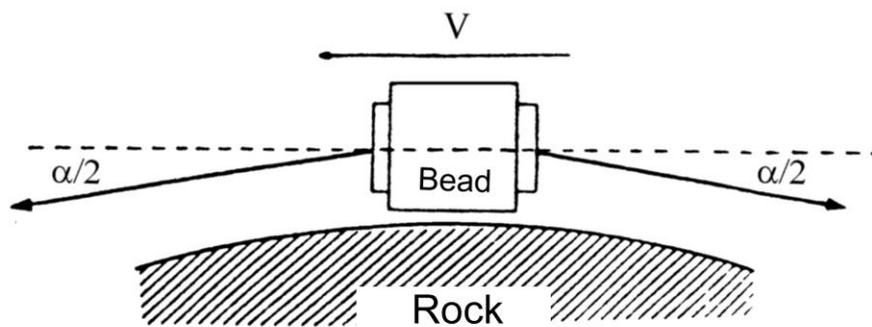


Figura 30. Esquema do corte de rochas com o fio diamantado (Bortolussi, *et al.*, 1994).

CAPITULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Na presente pesquisa, a obtenção de compósitos diamantados à base de Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC, com adições de diamantes em diferentes granulometrias, B₄C com diamante, ZrC com diamante e cBN com diamante, a fim de serem utilizados como pérolas diamantadas para corte de rochas ornamentais.

3.1 MATERIAIS

Os seguintes materiais foram empregados nos processos de produção dos fios diamantados:

(a) Matriz metálica:

- Liga 4885 Eurotungstene (Fe – Cu – Co – P)
- Pó de Ni – 2 µm (Derivata)
- Pó de Sn – 2 µm (Derivata)
- Pó de WC - 5/10 µm (Derivata)

(b) Abrasivos:

- Pó de cBN – 44/37 µm (Trust Diamond)
- Pó de B₄C - 75/40 µm (TetraBor)
- Pó de ZrC - 5 µm (Aldrich)
- Cristais de diamante com granulometria de 50/60, 40/50 e 2 µm – (Zhongnan).
- Cabo de aço cedido pela empresa.

A GTWIRE utiliza como matriz metálica a liga 4885, objetivando uma possível melhora no desgaste das pérolas, nesta tese foram introduzidos na matriz metálicas os aditivos Ni, Sn e WC.

3.2. SELEÇÃO DAS MISTURAS E PRODUÇÃO DAS PÉROLAS DIAMANTADAS

Com base na experiência da empresa GT Wire e confrontados com os dados da literatura, foram definidas as composições de todas as amostras produzidas como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Composições de todas as amostras produzidas.

Elemento	B1-B2-B3-B4
	Massa (%)
Fe	47,41
Cu	25,5
Co	12,04
P	1,05
Ni	7
Sn	5
WC	2

A fim de facilitar a leitura dos resultados, as amostras foram nomeadas de acordo com a Figura 31.

B1	<ul style="list-style-type: none"> • Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC • diamantes com as granulometrias de 50/60 μm, 40/50 μm e 2 μm
B2	<ul style="list-style-type: none"> • Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC • com a adição de cBN e diamantes com granulometria 50/60 μm e 40/50 μm
B3	<ul style="list-style-type: none"> • Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC • com adição de B_4C e diamantes com granulometria 50/60 μm, 40/50 μm
B4	<ul style="list-style-type: none"> • Fe-Cu-Co-P-Ni-Sn-WC • com adição de ZrC e diamantes com granulometria 50/60 μm, 40/50 μm

Figura 31. Seleção das misturas para produção das pérolas.

A produção de todas as pérolas foi realizada na empresa GT Wire, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES.

3.4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS PÉROLAS DIAMANTADAS

Na Figura 32 está apresentado de forma esquemática todas as etapas do processo de manufatura das pérolas diamantadas.

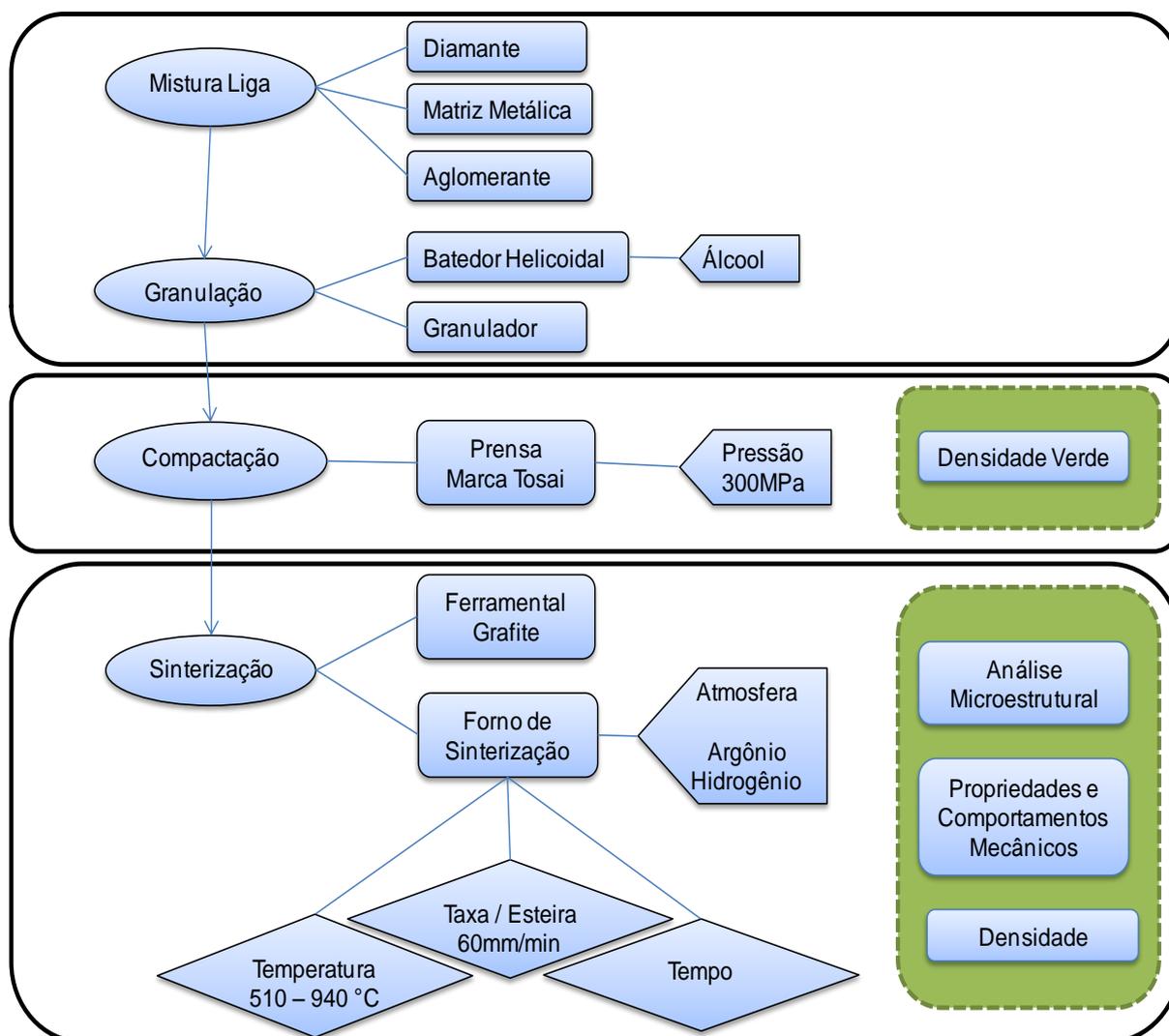


Figura 32. Fluxograma do Processo de Produção das Pérolas Diamantadas.

3.4.1 Mistura dos Pós

Após a definição das melhores composições para a confecção das pérolas, os pós foram pesados e colocados em vaso lacrado e inseridos no misturador do tipo Turbula, Figura 33. Após 90 min de mistura o misturador foi desligado e o vaso foi retirado e aberto para adição dos diamantes e do aglomerante, chamado na empresa por “cola”, em 1,5% em peso, o qual tem a função de facilitar a granulação

da mistura, a qual constitui-se na última etapa da preparação da mistura para posterior prensagem a frio. A seguir o vaso foi novamente fechado e inserido no misturador para finalizar a etapa de mistura, ficando o mesmo ligado por mais 90 minutos. Totalizando um tempo de mistura de 180 minutos. Este procedimento foi utilizado para preparação dos 4 tipos de mistura utilizada para a confecção das pérolas, ou seja, B1, B2, B3 e B4.



Figura 33. Misturador do tipo Turbula – Marca F. LLI Milano (GT Wire).

3.4.2. Granulação

Após ser submetida ao tempo de 3 horas de mistura, o pó contendo os metais, diamantes e aglomerante é retirado e transferido para um batedor do tipo helicoidal, Figura 34, é adicionado álcool até que se obtenha uma massa uniforme a qual é posteriormente transferida para o granulador (Figura 35 (a) e (b)).

Esse grau de uniformidade é avaliado visualmente durante a adição do álcool, sendo considerada pronta para ser transferida para o granulador, quando a mesma apresentar um aspecto de mistura bem úmida. Essa fase é totalmente empírica, sendo considerado um know-how da empresa.

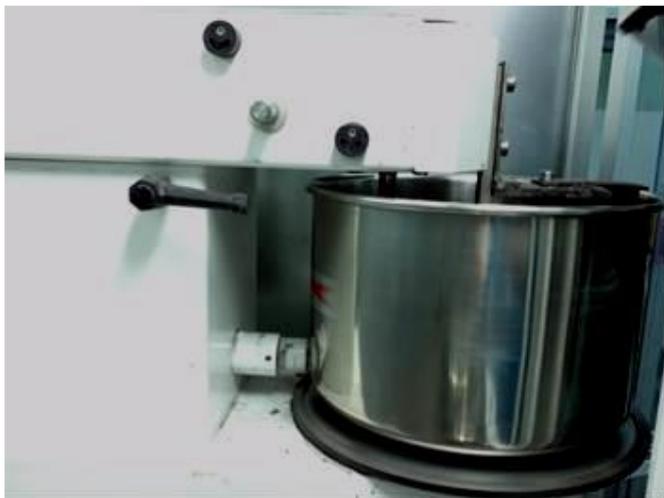


Figura 34. Batedor do tipo helicoidal (GT Wire).

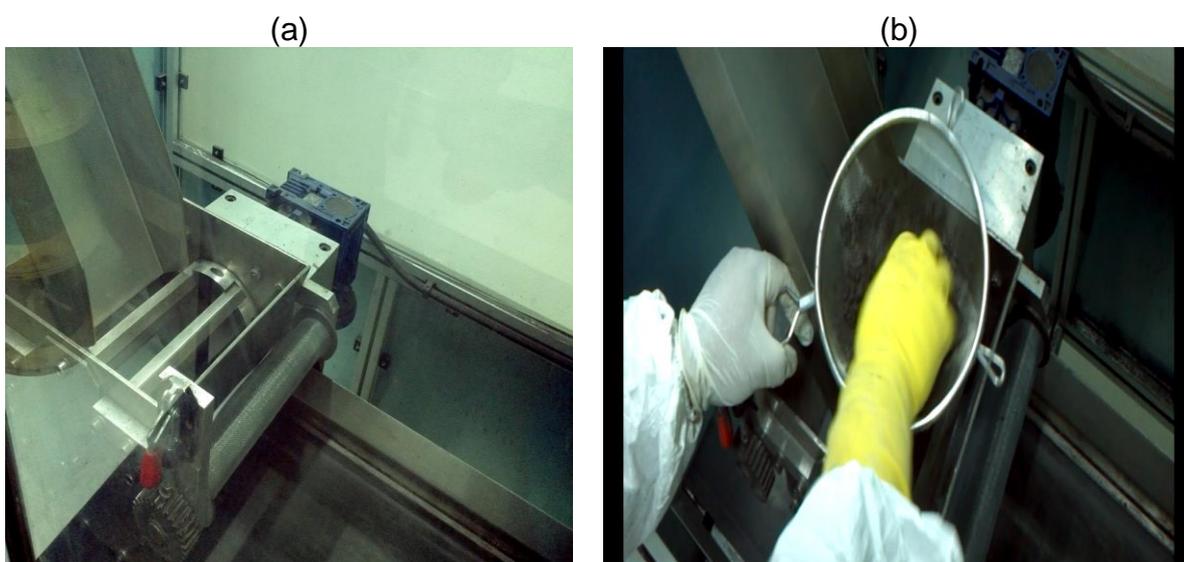


Figura 35. Granulador (GT Wire).

Após passar pelo granulador, o pó granulado cai em uma esteira (seta amarela) e passa para a etapa de secagem, remoção do álcool, Figura 36.

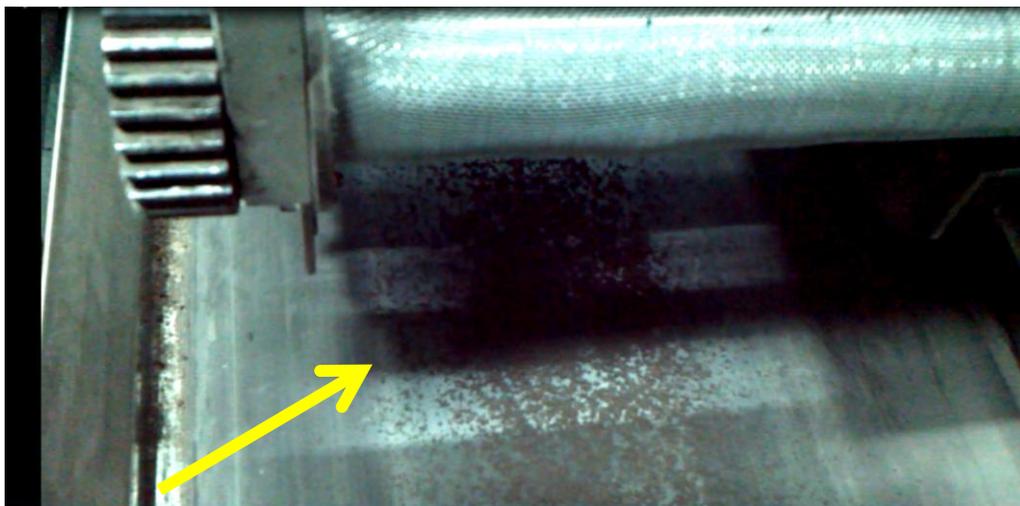


Figura 36. Pó granulado seguindo para secagem (GT Wire).

A etapa seguinte constitui-se na separação do pó que não sofreu granulação (finos) e, portanto precisa ser descartado. Para isso é utilizada uma peneira industrial equipada com aspirador, a qual separa os grânulos do pó fino, Figura 37.



Figura 37. Peneira separadora dos grânulos (GT Wire).

3.4.3. Compactação a frio

Após o término da granulação, segue-se a etapa de prensagem a frio da mistura para a obtenção das pérolas “verdes”. Esta etapa foi realizada em prensas da marca Tosai, sob pressão de 300 MPa com uma força de 40 Kgf por um tempo de 9,59 segundos.

Na Figura 38 (a) e (b) são vistas as pérolas obtidas após compactação. Por amostragem, as pérolas são medidas de tempos em tempos para o controle de qualidade dimensional.



Figura 38. (a) pérola à verde; (b) controle dimensional

3.4.4. Medida da densidade a verde das pérolas

Esta etapa foi feita em uma balança automática, Figura 39, a qual já fornece automaticamente o valor da densidade de cada peça.



Figura 39. Balança automática utilizada para as medidas de densidade, Marca KERN, (GT Wire).

3.4.5. Sinterização das pérolas

Para a sinterização das pérolas os corpos verdes são encaixados manualmente em suportes de aço-manganês revestidos com cobre e colocados em bandejas de grafite, conforme pode ser visto na Figura 40.

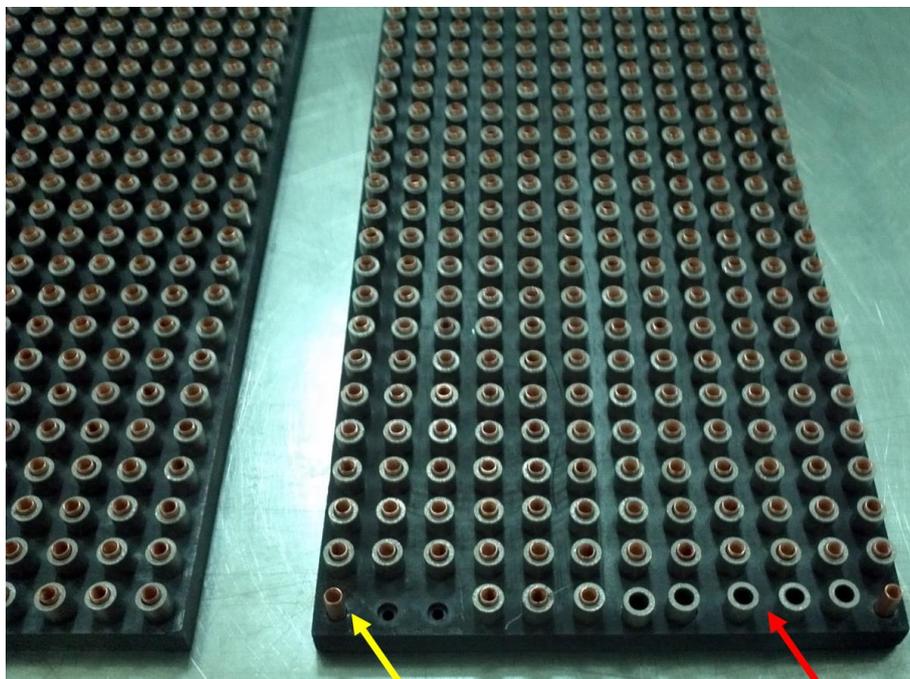


Figura 40. Bandeja de grafite já prontas para serem levadas para o forno (GT Wire).

Conforme pode ser visto na parte inferior da Figura 40, algumas pérolas foram propositalmente deixadas sem os suportes (seta vermelha) e também dois suportes nas extremidades sem as pérolas (seta amarela). Este procedimento foi feito para possibilitar a análise das pérolas sinterizadas sem a interferência da presença do tubo, principalmente, nas análises de difração de raios-x. No total foram fabricadas cerca de 750 pérolas para cada composição estudada. Esta quantidade é suficiente para a produção de um cabo de 19,91 m de comprimento e também para as análises de caracterização microestrutural e propriedades mecânicas (dureza e desgaste).

A sinterização foi realizada em um forno do tipo esteira (Figura 41) com atmosfera controlada de argônio e hidrogênio, com três zonas. Na zona 1 a temperatura foi de 510°C, na zona 2, 780°C e na zona 3, 940°C, as quais se constituem na rampa de aquecimento mostrada na Figura 42. O tempo de

sinterização é controlado pela velocidade da esteira que leva as amostras para o interior do forno, neste caso, 150mm/min, a qual é padrão da empresa.



Figura 41. Forno de sinterização com atmosfera controlada (GT Wire).

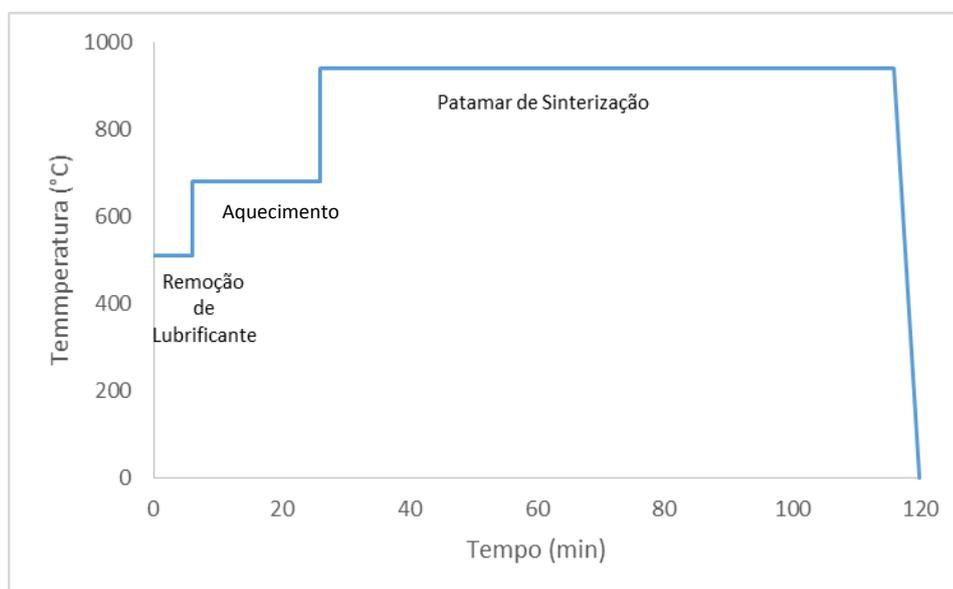


Figura 42. Parâmetros utilizados na Sinterização (GT Wire).

Após a sinterização é verificado se houve a fixação da pérola no suporte, caso não tenha ocorrido a brasagem da matriz no suporte, é necessária uma nova passagem pelo forno para que seja executado o processo de brasagem a qual se dá pela colocação de um anel de solda prata em cada pérola.

3.4.6. Montagem, Plastificação e Fechamento do fio

Esta etapa constitui-se em “know-how” da empresa GTWIRE e, portanto não pode ser aqui descrito. Na Figura 43, está apresentado o núcleo de plastificação dos cabos.



Figura 43. Núcleo de plastificação dos fios (GT Wire).

3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PÉROLAS SINTERIZADAS

Para caracterizar as pérolas produzidas, foram feitas análise microestrutural e determinação das propriedades mecânicas (dureza e desgaste).

3.5.1. Análise Microestrutural

Esta etapa foi realizada para investigar as fases formadas durante o processo de sinterização das pérolas, utilizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios X (DRX), e microscopia confocal.

3.5.1.1. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura será utilizada para observar e analisar as superfícies das amostras. Através de imagens de superfícies, esta técnica permite a visualização topográfica das amostras.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento muito versátil e usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos.

Será utilizado o MEV, marca SHIMADZU, modelo Superscan – SSX – 550 com EDS acoplado, disponível no Laboratório de Materiais Avançados da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (Figura 44).

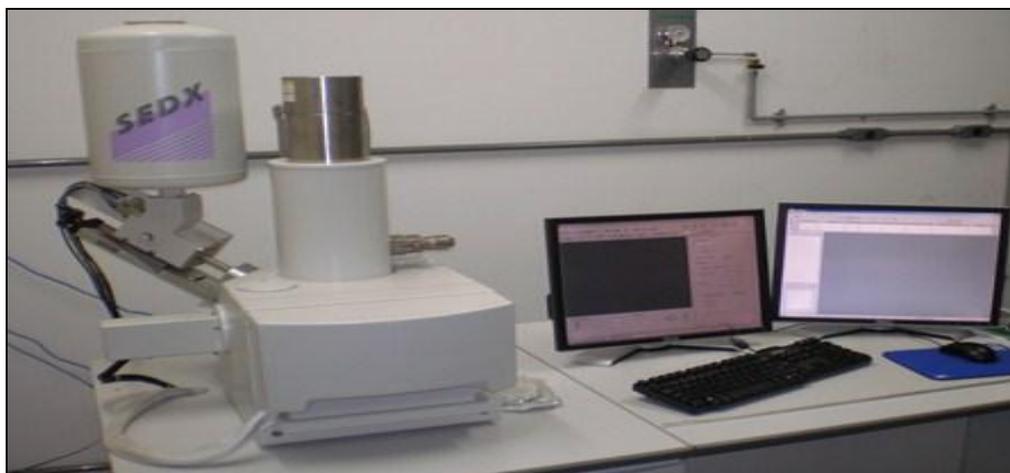


Figura 44. Microscópio Eletrônico de Varredura (LAMAV/UENF).

3.5.1.2. Difração de Raios X (DRX)

Após o procedimento de sinterização, uma amostra de cada parâmetro foi submetida a análise por DRX para investigação de existência de novas fases formadas durante o processo de sinterização.

As amostras foram inicialmente limpas no ultrassom (10min) e posteriormente analisadas utilizando o equipamento de difratômetro marca Shimadzu, utilizando a radiação de radiação $\text{Cu-K}\alpha$, com passo $0,02^\circ/\text{seg.}$, $2\theta = 20^\circ\text{-}90^\circ$. Após a realização dos ensaios, os resultados serão fornecidos em forma de tabela contendo valores de intensidades dos picos de cada fase e seus ângulos 2θ , estes valores serão plotados em forma de gráfico, possibilitando a obtenção do difratograma. Os difratogramas obtidos serão analisados comparando os valores observados com os padrões (fichas) PDF, segundo o sistema JCPDS – Joint Comitee of Powder Diffraction Standards, a fim de identificar as fases presentes em cada amostra.

3.5.1.3. Microscopia Confocal

A microscopia confocal foi útil para obter imagens bidimensionais e tridimensionais. O microscópio confocal a laser utilizado nesta pesquisa foi o Olympus modelo LEXT OLS4000 (Figura 45). Por meio dele foi possível coletar imagens dos compósitos em diferentes aumentos, após serem fragmentados.



Figura 45. Microscópio confocal a laser Olympus modelo LEXT OLS4000 (LAMAV/UENF).

3.5.2. Propriedades e Comportamento mecânico.

Para analisar as propriedades e o comportamento mecânico das pérolas foram realizados ensaios de desgaste e dureza.

3.5.2.1. Ensaio de desgaste

O objetivo do ensaio foi determinar a resistência ao desgaste abrasivo das pérolas diamantadas sinterizadas. Os ensaios foram feitos em uma politriz da marca AROTEC/AROPOL adaptada de acordo com a norma indicada para ensaio de desgaste. Nesta tese foi utilizado o ensaio do tipo “pino-disco” descrito na norma ASTM G99. Foi feita uma adequação (garra) da norma para possibilitar a análise de desgaste das pérolas produzidas em condições o mais próximo possível das reais

(Figura 46). E os resultados foram expressos em porcentagem de massa removida do compacto e do disco abrasivo de granito.



Figura 46. Abrasímetro, marca AROTEC (LAMAV/UENF).

Os seguintes procedimentos foram realizados:

- a) As amostras foram pesadas em uma balança analítica da marca SCALTEC antes do início dos testes. Depois, as amostras foram fixadas no suporte da máquina perpendicularmente à superfície do disco abrasivo de granito;
- b) Uma carga aplicada igual ao peso da amostra somado o peso do adaptador (556 g) foi colocada sobre a amostra que comprime o disco de granito;
- c) O disco de granito foi posto a girar em sentido horário com velocidade constante de 200 rpm, utilizando a água como lubrificação e refrigerante numa vazão de 0,5 L/min, durante 30 min, com paradas de 10 em 10 minutos para aquisição de dados;
- d) Ao término do tempo de desgaste, as pérolas diamantadas foram limpas em ultrassom e secas e em seguida resfriadas num dessecador;
- e) As pérolas diamantadas foram novamente pesadas. As pesagens antes e depois dos ensaios das amostras foram repetidas três vezes e os valores médios foram adotados para representar o resultado;
- f) As perdas de massa das amostras foram determinadas através da Equação 1;

$$\% \Delta Massa = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde m_i e m_f são, respectivamente, massas antes e depois do ensaio.

g) A resistência à abrasão foi medida através da Equação 2:

$$RA = \frac{1}{\% \Delta Massa} \quad (2)$$

É importante observar que, durante os ensaios, houve bastante trepidação e impactos da amostra sobre o disco de granito, afastando as condições de ensaios reais. Isso foi ocasionado pelo excessivo número de irregularidades sobre a superfície do disco. Mesmo assim, os resultados serviram de parâmetro para avaliação.

3.5.2.2. Dureza Rockwell B

É uma propriedade dos materiais sólidos relativa à resistência a deformações permanentes quando submetidos a uma força externa. Existem diversos métodos para a medição da dureza de um material, por exemplo, Mohs, Rockwell, Brinnell, Vickers e Knoop (Warren, 1992). Está diretamente relacionada à capacidade do material resistir ao desgaste.

No teste de dureza rockwell B, a carga é aplicada em etapas. No primeiro estágio se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois se aplica a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material, neste caso foi utilizado a escala B. Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell B é do tipo esférico (esfera de aço 1/16"). Uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada.

As amostras foram submetidas ao teste de dureza Rockwell B, utilizando o durômetro da marca ERNST (Figura 47), com carga de 980,7 N, pelo tempo de 15 segundos. Foram realizadas medições em quatro pontos diferentes da superfície

das amostras. O procedimento de medida se inicia colocando a pérola no suporte e então feito o 1º ponto. Os três pontos seguintes são obtidos girando a amostra de 90 em 90 ° até completar 360°, girando a pérola inteira.



Figura 47. Durômetro utilizado para medições de dureza Rockwell B, marca ERNST, modelo NR 3D (GT Wire).

3.5.3. Densidade (ρ) das pérolas.

Uma das propriedades mais importantes para avaliar a efetividade da sinterização das amostras é a densidade.

Esta etapa foi feita em uma balança automática, Figura 39, a qual já fornece automaticamente o valor da densidade de cada peça.

3.5.3.1. Densidade Teórica

A determinação da densidade teórica é normalmente realizada através de uma ponderação das densidades reais (cristalográficas) dos materiais que compõe a mistura, encontrado na literatura, e suas respectivas proporções. Obtém-se a densidade teórica da mistura através da soma dos valores dos diferentes percentuais de ligantes.

A equação 3 apresenta a fórmula adotada para cálculo da densidade teórica da mistura através da soma das massas (m) e das densidades reais (ρ) dos materiais de partida.

$$\rho = \frac{m_{Fe} + m_{Cu} + m_{Ni} + m_{Sn} + m_{WC} + m_{Co} + m_P}{\frac{m_{Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{m_{Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{m_{Ni}}{\rho_{Ni}} + \frac{m_{Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{m_{WC}}{\rho_{WC}} + \frac{m_{Co}}{\rho_{Co}} + \frac{m_P}{\rho_P}} \quad (3)$$

3.5.3.2. Densidade Aparente

Pelo método de Arquimedes, foi então calculada a densidade aparente das pérolas, de acordo com a equação 4.

$$\rho_a = \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (4)$$

Onde:

ρ_a – densidade aparente;

M_s – massa seca;

M_u – massa úmida;

M_i – massa imersa.

3.5.3.3. Densidade Relativa

Com base nas medições da densidade aparente e a teórica, foi possível obter a densidade relativa (ρ_R) ou densificação das amostras, cujo cálculo (equação 5) baseia-se na razão entre a densidade aparente e a densidade teórica das amostras (Frade e Paiva, 2006).

$$\rho_r = \frac{\rho_a}{\rho_t} \quad (5)$$

CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados referentes à obtenção e caracterização das pérolas de fios diamantados, produzidas em uma empresa especializada, localizada em Cachoeiro de Itapemirim – ES, bem como dos testes dos fios diamantados em condições reais de serviço.

4.1 PÉROLAS PRODUZIDAS

A Figura 48 apresenta a fotografia das pérolas produzidas com as composições apresentadas na metodologia. Os parâmetros de sinterização foram escolhidos com base na linha de fabricação da empresa GT Wire e na literatura.

Os compósitos diamantados das pérolas produzidas por este estudo, foram sinterizados diretamente no tubo de aço fornecido pela empresa GT Wire. No caso de ser verificado que a pérola não aderiu completamente ao suporte, é necessário a utilização do anel de solda prata e uma nova passagem no forno, conforme descrito na metodologia.



Figura 48. Exemplo das pérolas produzidas.

4.2 ADERÊNCIA DOS COMPÓSITOS DIAMANTADOS AO TUDO DE AÇO

O próximo passo foi a verificação da adesão da matriz diamantada no tubo. Este teste é feito de maneira empírica na empresa GT Wire e consiste em prender a pérola em uma morsa e compactá-la em várias direções até a quebra da pérola. Um exemplo de uma pérola com boa adesão está apresentada na Figura 49.



Figura 49. Fotografia da pérola após o teste com morsa.

Cabe mencionar que, embora de forma empírica, este teste é capaz de mostrar que a matriz está bem aderida na parede do tubo. Isso demonstra que ela pode ser utilizada para a montagem do fio.

Após a realização do teste, foi verificado que apenas as pérolas diamantadas B1 e B2 foram autossoldáveis. Entretanto, as pérolas B3 e B4 não foram autossoldáveis e com isso foi necessário que estas pérolas fossem novamente levadas ao forno para uma etapa de brasagem, com solda prata.

As pérolas produzidas B1 e B2, as quais exibiram os melhores resultados no que tange ao alcance dos objetivos da presente pesquisa, foram analisadas por microscopia eletrônica. Foi observada uma forte aderência dos compósitos B1 e B2 sobre o tubo. A Figura 50 mostra a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura que evidencia essa característica, pois não é notado nenhuma lacuna entre a parede do tubo (seta tracejada) e o corpo da pérola (seta contínua).

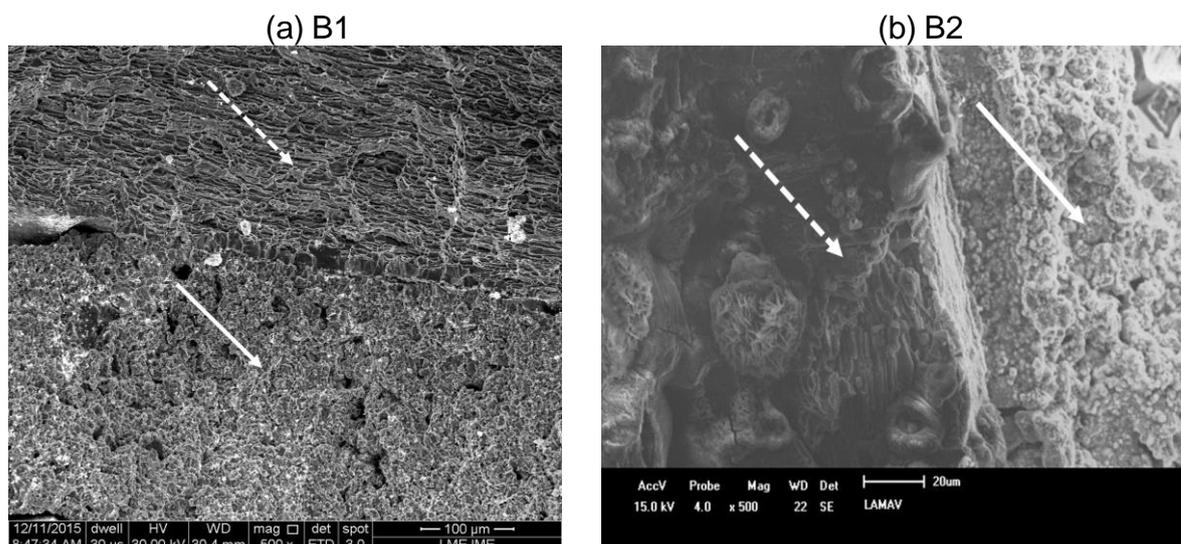


Figura 50. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B1 e (b) B2.

Nestas pérolas não houve uso de solda prata. Logo, o processo de “auto-soldagem” foi realizado devido a contração da matriz, sendo a mesma fixada no tubo por “encaixe” por pressão. Desta forma não há interação química e sim mecânica, ou seja, encaixe por interferência.

Embora a matriz tenha sido a mesma, B3 e B4 não foram autossoldantes. Provavelmente a presença do carbeto de boro em (B3) e do carbeto de Zircônio em (B4) podem ter sido os responsáveis pela não aderência da matriz da pérola no tubo de aço, uma vez que estes compostos não estavam presentes em B1 e B2 e podem, eventualmente, ter interferido no processo de contração da matriz. Porém, as análises realizadas não permitiram que se chegasse a uma conclusão definitiva sobre esse efeito, necessitando então de estudos posteriores que permitam determinar se realmente essa foi a causa da não aderência.

As pérolas B3 e B4 também foram analisadas por microscopia eletrônica. A Figura 51 mostra a fraca aderência dos compósitos no tubo de aço, verificando a presença de lacunas entre a pérola (seta contínua) e o tubo de aço (seta tracejada).

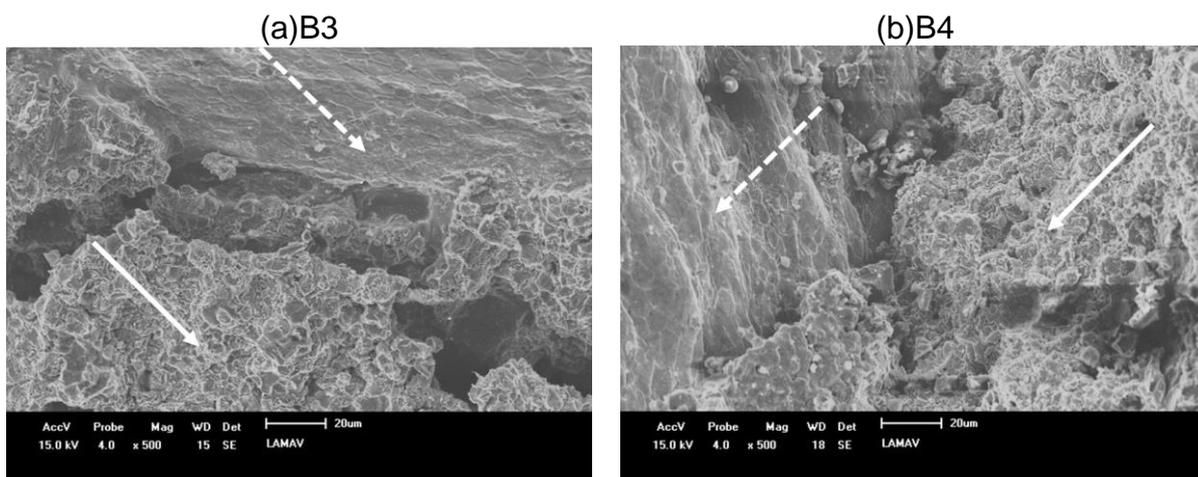


Figura 51. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B3 e (b) B4.

4.3. ADERÊNCIA DOS DIAMANTES À MATRIZ

A Figura 52 mostra a microscopia eletrônica de varredura das pérolas B1, B2, B3 e B4. Conforme pode ser visto na Figura 52 (a), além de mostrar uma alta aderência entre a matriz e o tubo, mostra uma fraca aderência do cristal de diamante com a matriz. Pode ser observado nas pérolas B2 Figura 52 (b) e B4 Figura 52 (d) uma alta aderência dos cristais à matriz. Já na Figura 52 (c) na qual está apresentado o aspecto da pérola B3, nota-se que há uma boa aderência do cristal de diamante na matriz, porém, fica evidente a total falta de união entre a matriz e o tubo.

De acordo com Lowel e Shields (1984) a aderência entre dois materiais pode ser em função da molhabilidade, onde o ângulo de contato entre dois materiais é nulo. As imagens obtidas na Figura 52 foram obtidas em vista superior da pérola, mesmo assim é possível observar a adesão dos cristais à matriz.

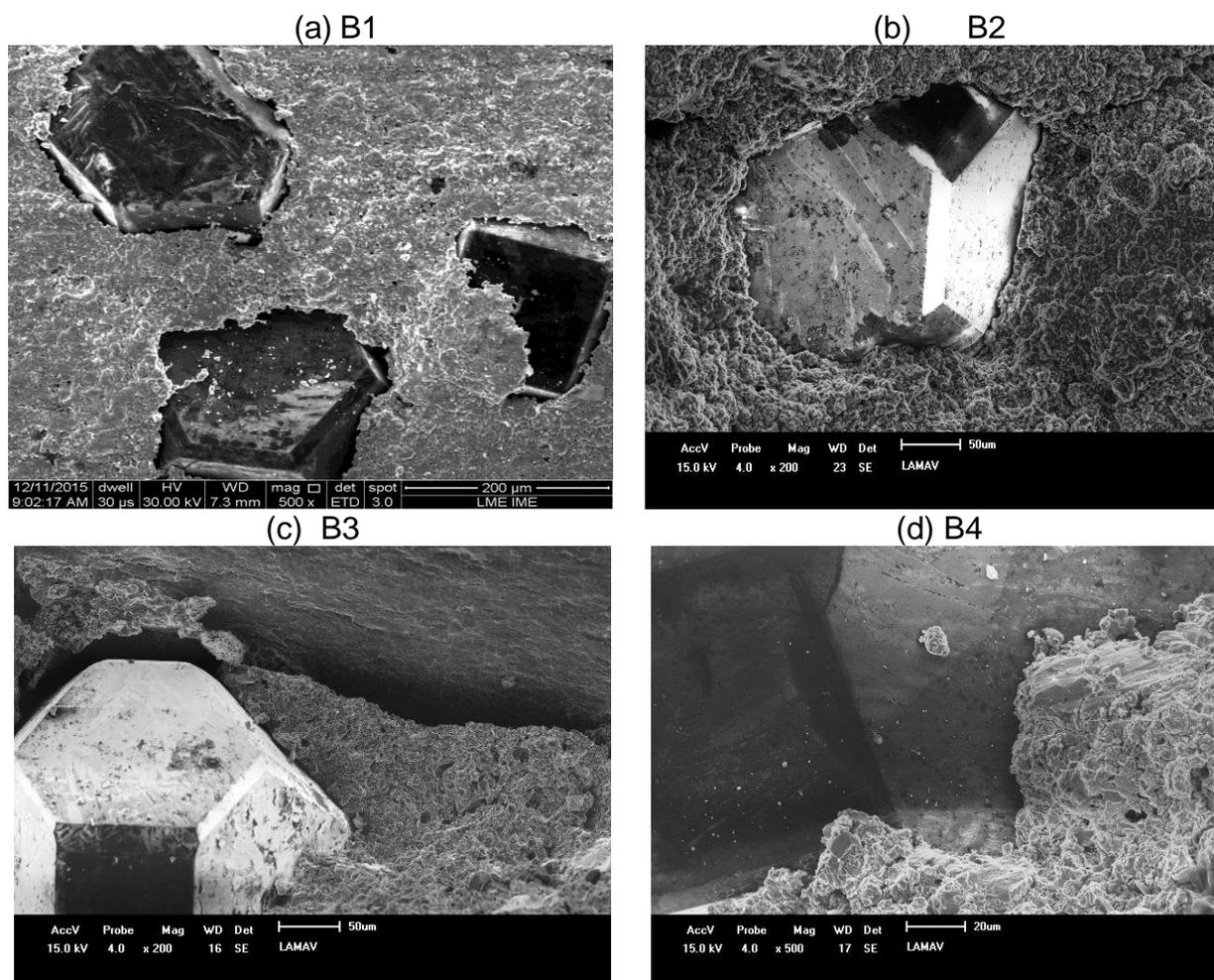


Figura 52. Micrografia eletrônica de varredura das pérolas (a) B1, (b) B2 (c) B3 e (d) B4.

4.4. CARACTERIZAÇÃO

4.4.1. Difração de Raios-X

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica utilizada para determinar as estruturas presentes nos compósitos diamantados. Essa análise foi realizada após a sinterização das amostras.

Os difratogramas das amostras em estudo possuem pouco background ruidoso, sendo favorável à identificação dos picos. Os picos significativos com os padrões presentes no software PCPDWIN foram identificados para análise qualitativa por difração de raios-x nas amostras do presente trabalho.

As amostras apresentaram resultados semelhantes para as composições das fases, uma vez que a matriz utilizada em B1, B2, B3 e B4 foram as mesmas, o que diferenciou foram os abrasivos usados.

4.4.1.1. Difratoograma da Pérola Diamantada B1

O difratograma da pérola diamantada B1, após a sinterização, está apresentada na Figura 53, evidenciando a presença das soluções sólidas Fe_4Cu_3 , Co_3Fe_7 , FeNi , WC , Cu_9NiSn_3 , $\text{Cu}_{40}\text{Sn}_{11}$, Fe e Diamante. A presença predominante de composições a base de Fe e Cu é justificado por serem os elementos de maior quantidade (% em peso) de material na matriz do compósito.

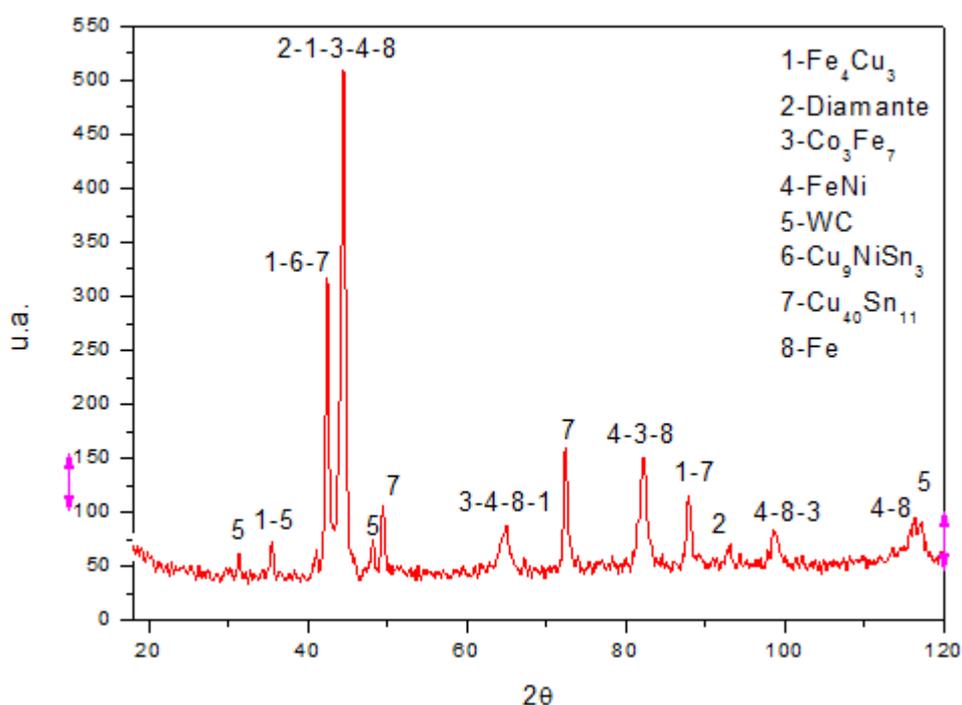


Figura 53. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B1.

A maioria dos elementos usados na produção das pérolas diamantadas apresenta seus pontos de fusão superiores à temperatura de sinterização, segundo os padrões de sinterização usados no presente trabalho.

De acordo com Kittel (2006), a alta solubilidade entre o Fe e Co e a temperatura de sinterização de 910°C utilizada no trabalho, podem ter contribuído para a formação da fase Co_3Fe_7 . Pode ser observado no diagrama de fases Fe-Co (Apêndice A Figura 1) que estes elementos sinterizam por meio de solução sólida, devido a sua afinidade e solubilidade de um para o outro na temperatura de sinterização.

O patamar de sinterização do presente trabalho é 910°C, e o ponto de fusão do Ferro e do Cobre são, 1538°C e 1085°C, respectivamente, logo não ocorreu fusão destes dois elementos, confirmando a presença de uma solução sólida Fe_4Cu_3 que é caracterizada pela alta solubilidade do cobre com o ferro e baixa solubilidade do ferro com o cobre. Isto pode ser observado com a análise do diagrama de fases do sistema CuFe (Apêndice A Figura 2).

A formação da solução sólida de Fe_4Cu_3 promove o aumento de algumas propriedades mecânicas de interesse. Dentre elas pode-se destacar a resistência a tração e a dureza, as quais são acrescidas em magnitude da ordem de 50 a 60%, em comparação ao cobre e ferro puros (Tandon e Johnson, 1998). Segundo Filgueira e Pinatti (2003), essas duas propriedades acima estão diretamente ligadas à aderência para com os cristais de diamante.

O tamanho do raio atômico dos elementos Fe, Cu, Co (0,124 nm, 0,128 nm e 0,125nm, respectivamente) deve ser levado em consideração, pois, segundo Callister (2008) as quantidades apreciáveis do soluto podem ser acomodadas na solução sólida somente quando a diferença entre os raios atômicos dos elementos é menor 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.

Observa-se a ocorrência do pico do diamante por volta de 44,5°. Além disso, não foram encontradas evidências sobre a ocorrência da reação entre os elementos de liga e os diamantes, isto é nenhuma reação da liga com o C do diamante. Isto demonstra que os diamantes não sofreram o processo de grafitação, o qual é extremamente danoso para a eficiência e vida útil das ferramentas (Wensheng, 2012). A presença de cristais de diamante evidencia que no processo de sinterização, os cristais de diamante não interferiram no processo de nucleação e crescimento das fases metálicas.

Foi observado também 3 picos de WC. Este elemento possui um ponto de fusão muito maior que o utilizado neste trabalho, garantindo assim a utilização deste componente apenas como reforço, não ocorrendo a interação entre outros componentes.

4.4.1.2. Difratoograma da Pérola Diamantada B2

O resultado da análise do difratograma da pérola diamantada B2 é bem similar ao difratograma da amostra B1, considerando que foi utilizado a mesma matriz para todas as pérolas diamantadas, apresentando as mesmas composições das fases presentes, diferenciando somente nos materiais abrasivos utilizados, no caso de B2, nota-se a presença do cBN.

Analisando a Figura 5554, verificou-se a presença de 3 picos de cBN no difratograma.

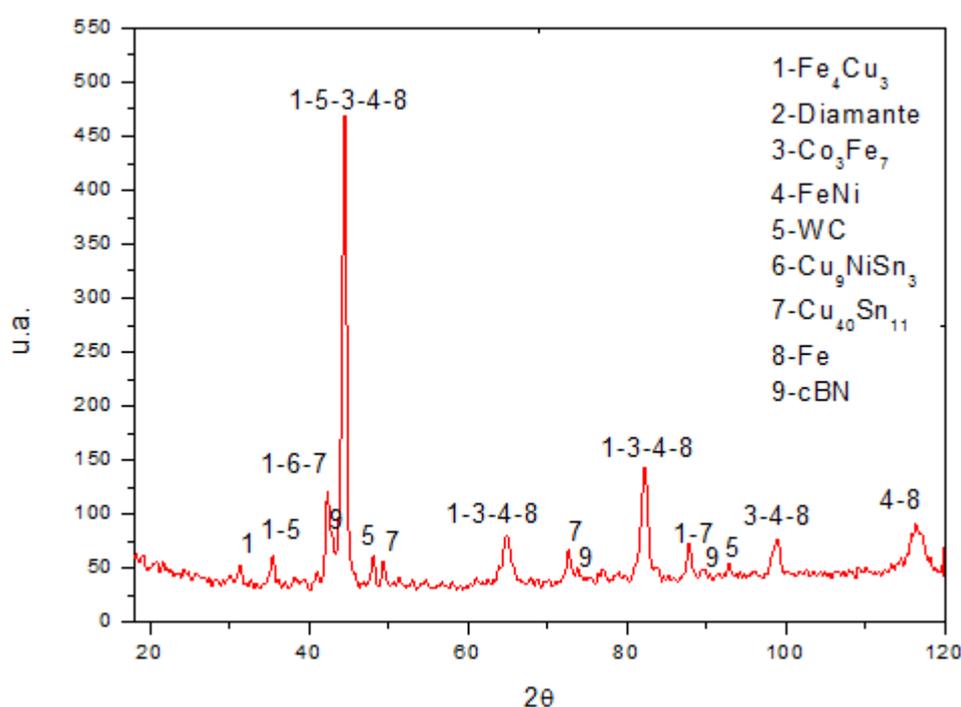


Figura 5554. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B2.

4.4.1.3. Difratoograma da Pérola Diamantada B3

A Figura 5655 mostra o difratograma da pérola diamantada B3, além da presença das fases dos componentes da matriz, observou-se a presença de 3 picos do abrasivo B₄C.

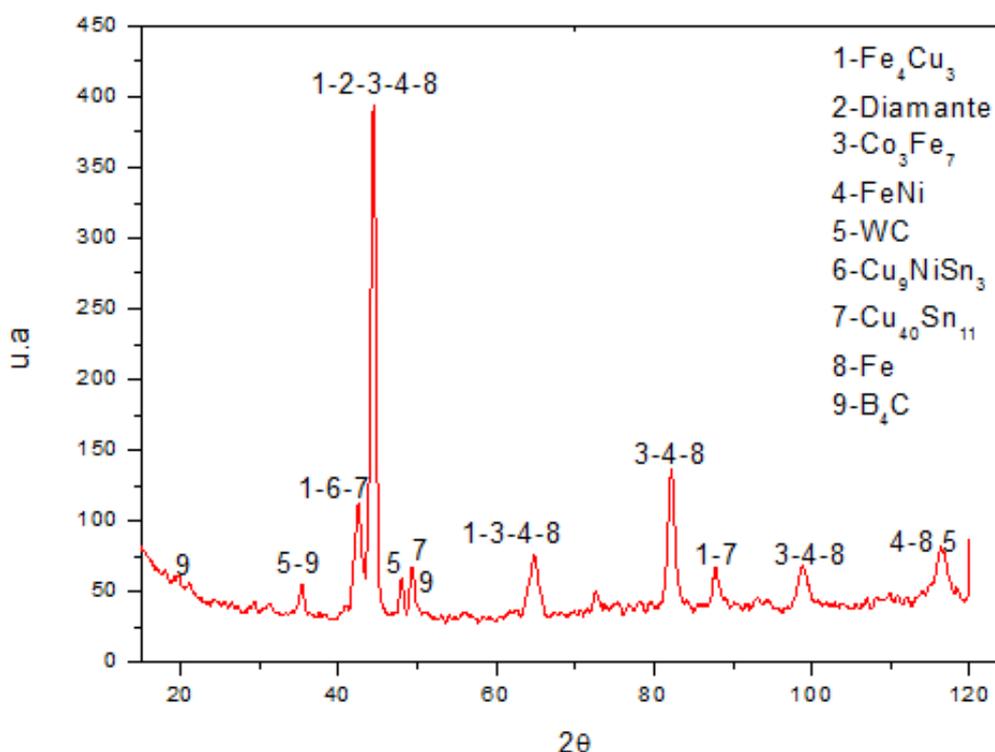


Figura 5655. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B3.

O B_4C é o terceiro material mais duro conhecido rico em C, seguido pelo diamante e pelo nitreto cúbico de boro, sendo por isso muitas vezes designado de diamante negro (devido à tonalidade escura que apresenta) (Kulikovsky, *et al.*, 2009). O B_4C tem se transformado num importante material devido a seu alto ponto de fusão (2450– $^{\circ}C$), alta dureza (45 GPa), baixa densidade (2,51 g/cm³) e excelentes propriedades mecânicas. Sua alta relação de resistência/densidade o transforma em um importante material para a indústria (Ma, 2010).

4.4.1.4. Difratoograma da Pérola Diamantada B4.

No difratoograma de B4 (Figura 5756), nota-se que ocorreram 3 picos de ZrC, os outros picos foram similares aos outros difratogramas.

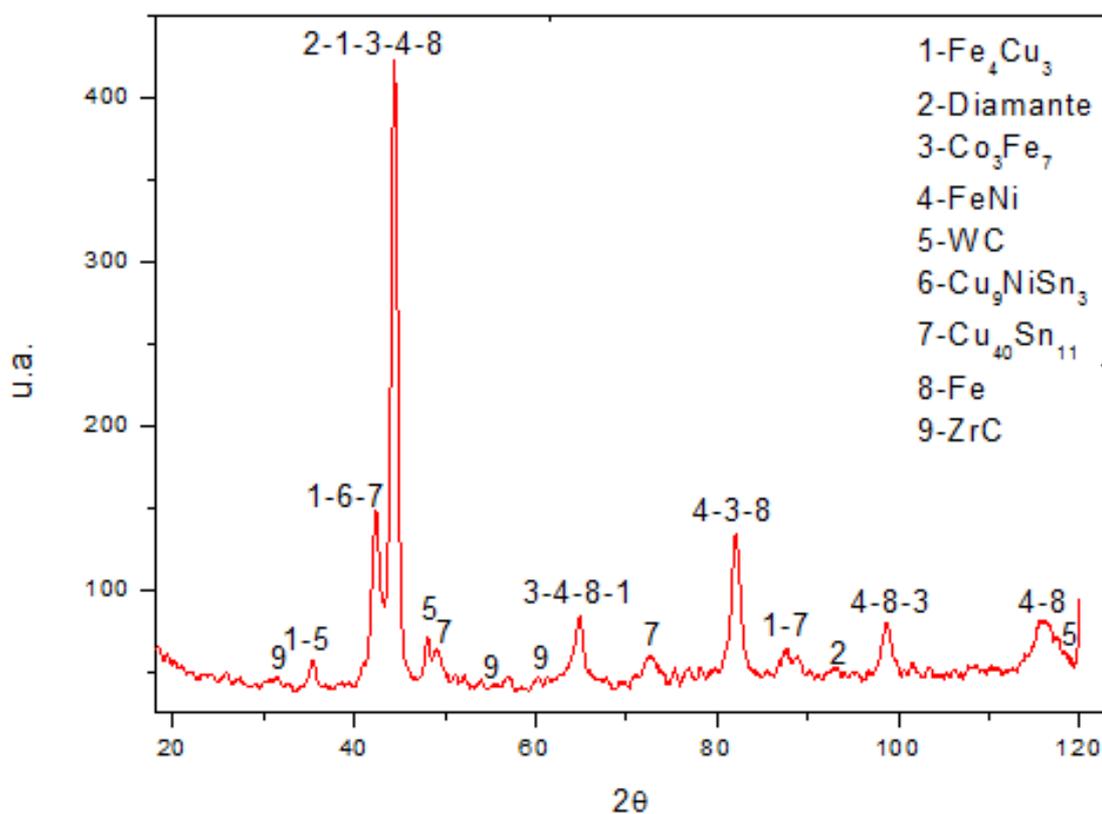


Figura 5756. Difratoograma de Raios-X obtido na análise de pérola diamantada processada com a liga B4.

A utilização de ZrC como abrasivo, tem atraído muita atenção devido ao seu alto ponto de fusão, boa resistência ao choque térmico, a corrosão e ao desgaste (Zhang, *et al.*, 2012). A temperatura de fusão do ZrC é mais alta que a temperatura de sinterização do trabalho, observando assim que o ZrC não reagiu com nenhum outro elemento da matriz.

Na Figura 5857, estão dispostos os difratogramas das pérolas B1, B2, B3 e B4, facilitando assim a verificação da semelhança entre os difratogramas das amostras, mostrando apenas a diferença entre os abrasivos utilizados.

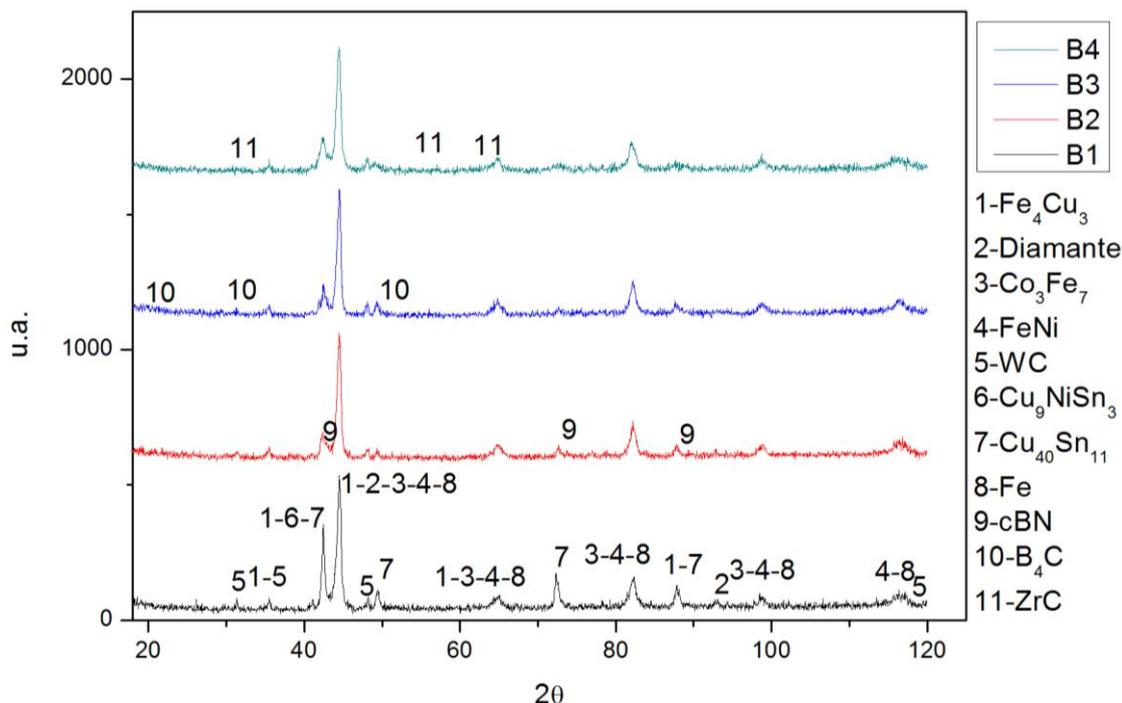


Figura 5857. Difratoograma de Raios-X obtido na análise das pérolas diamantadas B1, B2, B3, e B4.

4.5. COMPORTAMENTO MECÂNICO

4.5.1. Ensaio Desgaste

O ensaio de abrasão é o que mais se aproxima da realidade da aplicação dos compósitos diamantados. Durante o trabalho de corte das ferramentas, o atrito mecânico, os choques com o material de corte (peça), a vibração do equipamento e os efeitos térmicos locais, causam alterações na matriz do segmento de corte que podem prejudicar ou contribuir para a vida útil da ferramenta.

A Tabela 2 mostra os resultados de resistência a abrasão em função dos tempos de ensaio para todos os compósitos estudados, sinterizados a 940°C para cada pérola diamantada estudada, a Figura 5958 representa os resultados na forma de gráfico, mostrando o comportamento de cada uma em intervalos de tempos diferentes após perda de massa durante o ensaio. Foram utilizados tempos de 30 minutos com paradas de 10 em 10 minutos. Neste ensaio as amostras foram fixadas

de tal forma que as laterais da amostra ficaram em contato com a superfície do disco de granito fixado no abrasímetro, medindo a Resistência a Abrasão (RA) que é inversamente proporcional à perda de massa da amostra.

É importante observar que as condições presentes neste ensaio (rotação de 200 rpm, carga vertical de 550g e excesso de trepidação causada pelas irregularidades do disco de granito) fizeram com que os segmentos fossem submetidos a condições mais severas do que as de trabalho de campo, pois foi gerado um grande número de impactos entre o disco e a amostra.

Tabela 2. Resultados da perda de massa e Resistência ao desgaste após teste de abrasão de 30 minutos.

Pérolas	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)	Resistência a Abrasão
B1	0,138	7,31	0,14
B2	0,032	1,73	0,57
B3	0,091	4,82	0,21
B4	0,028	1,44	0,69

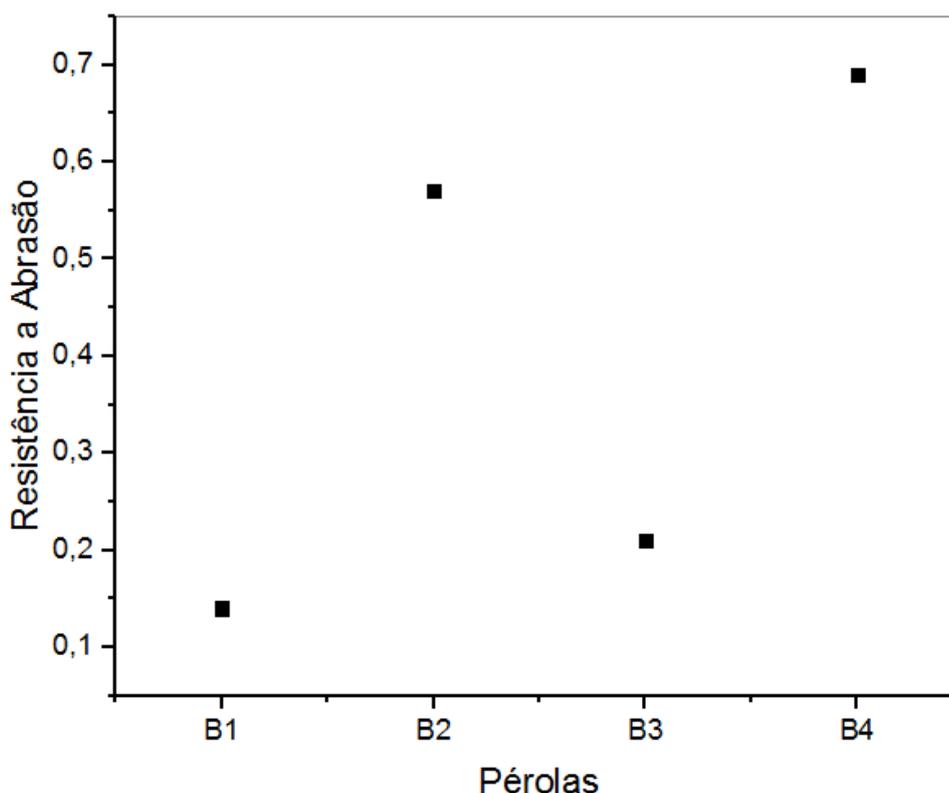


Figura 5958. Gráfico da resistência a abrasão *versus* tempo obtido no teste de desgaste das pérolas diamantadas no tempo final de 30 minutos.

Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos do ensaio de resistência à abrasão (RA) para cada pérola diamantada estudada neste trabalho, mostrando o comportamento de cada uma em intervalos de tempos diferentes após perda de massa durante o ensaio.

Tabela 3. Resistência a abrasão das pérolas diamantadas

Tempo (min)	Resistência a abrasão			
	B1	B2	B3	B4
10	0,23	2,63	0,26	0,97
20	0,16	1,02	0,22	0,78
30	0,14	0,57	0,21	0,69

Na Figura [6059](#), apresentam-se os resultados de RA, dispostos em gráfico, para melhor entendimento. Analisando-se o ensaio para o tempo de 10 minutos, nota-se que a pérola B2 obteve valor mais alto de resistência à abrasão, comparando-se com as demais pérolas estudadas, o que indica que esta pérola quase não teve perda de massa nesse tempo de ensaio.

Para o ensaio de 20 minutos, percebeu-se uma queda na resistência a abrasão das pérolas diamantadas, o que indica uma maior perda de massa da pérola durante o trabalho de corte. É interessante observar, que, apesar de B2 ser a pérola de maior resistência a abrasão verificou-se a queda de resistência a abrasão de aproximadamente 60%, enquanto que a pérola B3 obteve menor queda em comparação com as demais.

Quando finaliza o ensaio em 30 minutos, observa-se, em relação a 20 minutos, que uma menor queda no valor de resistência a abrasão para a pérola B3. Entretanto, a pérola B2 continua com a maior queda.

Constata-se na Tabela 5 e na Figura 59, que há certa linearidade de RA para as pérolas B3 e B4, o que pode ser confirmado uma melhor aderência dos cristais de diamante na matriz.

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.

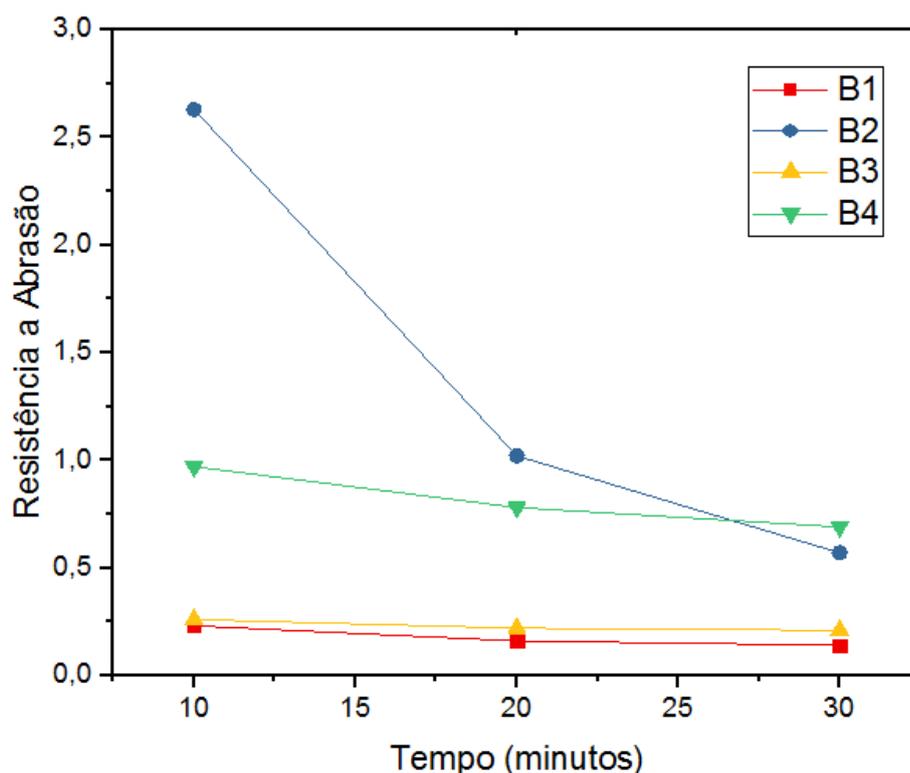


Figura 6059. Gráfico da resistência a abrasão *versus* tempo das pérolas diamantadas.

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.

A dureza de um material ligante para pérola de fio diamantado está relacionada 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.

Pode-se classificar as condições do diamante após o processo de serragem das rochas ornamentais em cinco tipos:

- (a) Cristais emergentes: São os diamantes recentemente expostos na matriz durante a etapa de corte. Neste caso, existe pouca capacidade de corte. Este processo ocorre, quando a matriz do composto é desgastada, o cristal de diamante é exposto e começa a participar ativamente do processo de corte. Logo, se a matriz for rígida impedirá a exposição de um novo cristal de diamante.

- (b) Cristais polidos: Apresentam uma área desgastada com faces lisas e planas e arestas arredondadas. Neste caso, a capacidade de corte é menos eficiente devido a este tipo de morfologia.
- (c) Cristais inteiros: São os cristais de diamante inteiro e bem facetados, realizam maior trabalho de corte.
- (d) Cristal Microfraturado: As microfraturas podem ocorrer durante o impacto do fio diamantado com material cortado. Tais cristais irão produzir novas arestas de corte afiada. No entanto, eles ainda mantêm a profundidade de corte.
- (e) Cristais macrofraturados: Causa redução da vida útil da ferramenta. O cristal perde completamente sua capacidade de corte.

As microfraturas podem ocorrer durante o impacto da ferramenta com o material cortado. As microfraturas são benéficas para a ferramenta uma vez que a sua ocorrência produz novas arestas de corte, embora a profundidade seja reduzida. Já a macrofratura dos diamantes causa uma redução acelerada da vida útil da ferramenta, uma vez que o cristal macrofraturado perde por completo sua capacidade de corte. Nas análises realizadas, observou-se que todas as pérolas apresentaram tanto micro quanto macrofraturas em proporções praticamente equilibradas.

Em virtude da planificação dos grãos abrasivos de diamante da etapa anterior, a matriz sofre intensa perda de massa pela abrasão com a pedra, expondo as demais faces dos cristais dos diamantes ainda embebidas na matriz, restando assim pouco ou quase nenhuma aderência matriz-ligante diamante, o que conseqüentemente leva a perda (pull-out) ou destacamento dos diamantes pela matriz.

Segundo Oliveira (2009), a ocorrência de Pull-out moderado, durante o trabalho de corte, é benéfico para a eficiência do segmento uma vez que cristais de diamantes fraturados, que já não participam do processo de corte, devem ser descartados para que surjam novas faces cortantes no segmento e assim a eficiência de corte seja mantida. Uma boa ferramenta é aquela que possui a capacidade de reter os cristais aptos para o trabalho de corte e eliminar os defeituosos.

Foram observadas ocorrência de pull-out em todas as pérolas (B1, B2, B3 e B4) analisadas no ensaio de desgaste por abrasão.

As variações de dureza presentes ao longo da matriz, como já verificado nos resultados dos ensaios de dureza Rockwell B do presente capítulo, podem causar um desgaste excessivo da matriz, em uma direção longitudinal e paralela ao corte, com aspecto parecido com uma calda de cometa, daí o nome dessa ocorrência ser denominada “efeito cometa”.

O efeito cometa causa uma profundidade localizada na matriz que pode descobrir novas arestas de corte de cristais de diamantes e assim aumentar a eficiência de corte. Entretanto, um rastro (calda) muito profundo pode contribuir para o pull-out dos cristais ou até mesmo favorecer a sua quebra.

A fim de destacar as características dos cristais de diamante após os ensaios de abrasão, foram acrescentados às micrografias obtidas por microscopia confocal, círculo com cores diferentes para facilitar a identificação de características encontradas nas pérolas estudadas.

Na Figura [6460](#) apresenta características dos diamantes da pérola B1 obtidos microscopia confocal após o processo de abrasão. Observa-se a presença cristais polidos (círculo rosa), cristais emergentes (círculo verde), microfraturados (círculo vermelho) e macrofraturados (círculo azul) e também a ocorrência de pull-out (círculo amarelo).

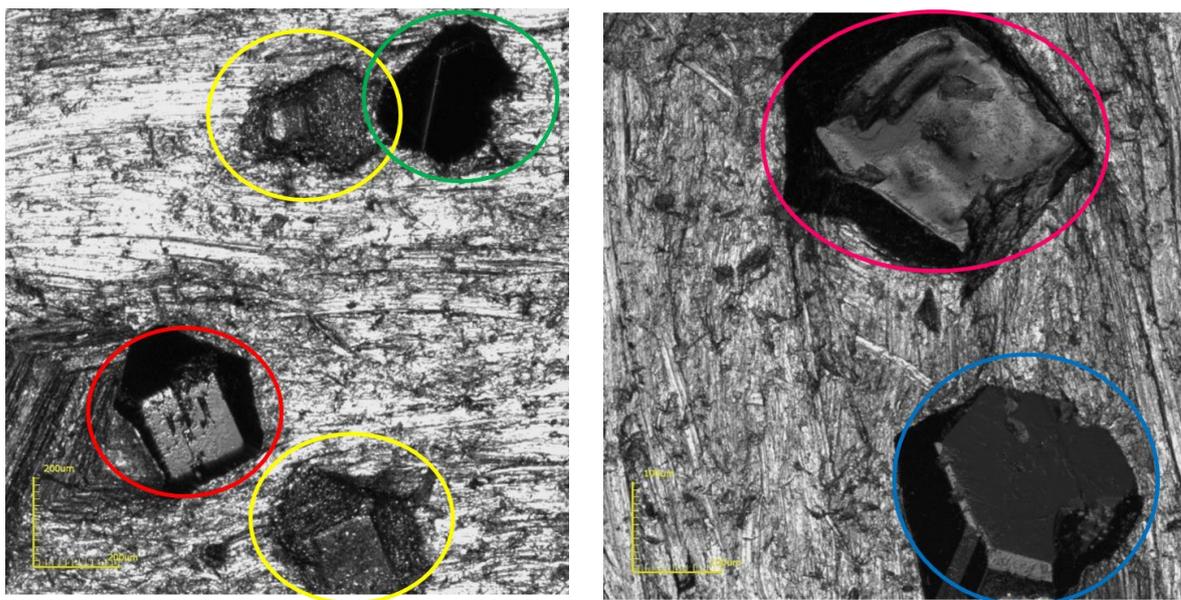


Figura [6460](#). Microscopia confocal da Pérola B1 após o desgaste.

As características verificadas na pérola B2 após e ensaio de abrasão é mostrada na Figura [6261](#). Nota-se a presença de cristais emergentes (círculo verde),

cristais micro (círculo vermelho) e macrofraturados (círculo azul). A seta azul mostra o efeito cometa e a círculo amarelo o pull-out.

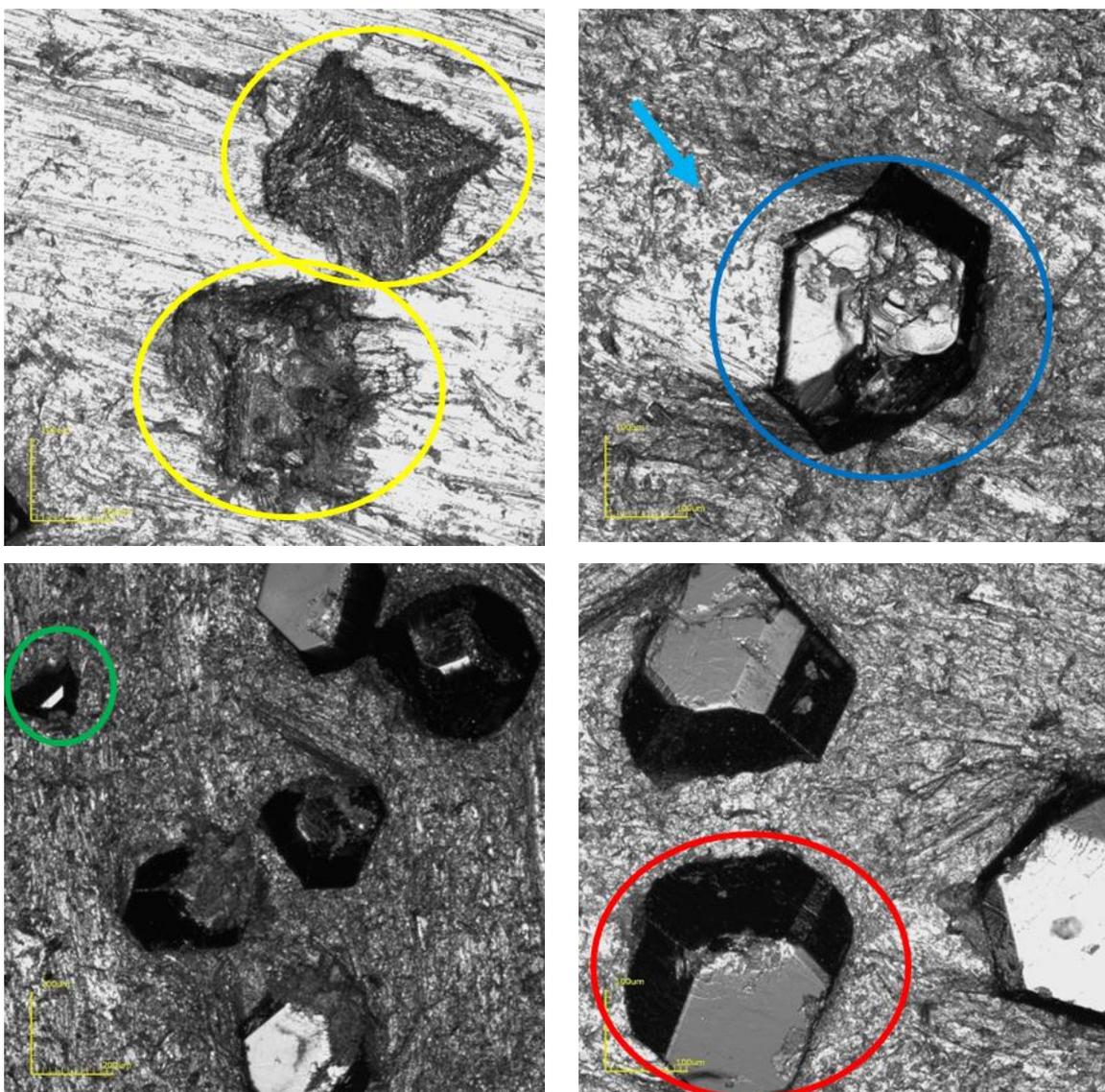


Figura [6261](#). Microscopia confocal da Pérola B2 após o desgaste.

Na pérola B3 também apresentou diversas características dos cristais de diamante (Figura [6362](#)) como cristais microfraturados (círculo vermelho), cristais emergentes (círculo verde) e inteiros (círculo roxo). Observa-se claramente a presença do efeito cometa (seta) e pull-out (círculo amarelo).

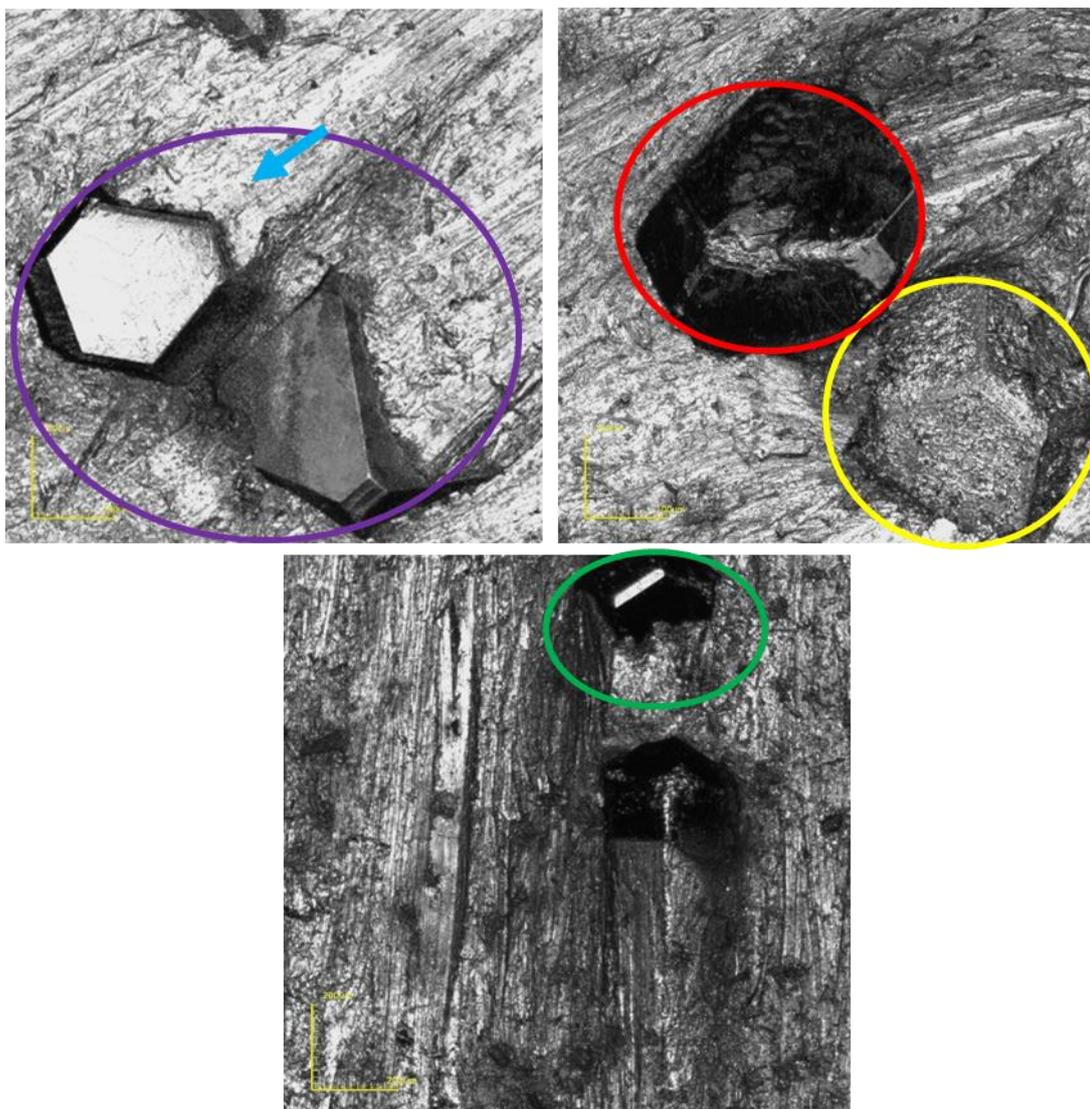


Figura [6362](#). Microscopia Confocal da pérola B3 após o desgaste.

A micrografia da pérola B4 é mostrada na Figura [6463](#). Foram verificados a presença de cristais de diamante microfraturados (círculo vermelho) e macrofraturados (círculo azul). O círculo roxo está destacando a presença de um cristal inteiro e o círculo amarelo mostrando um pull-out.

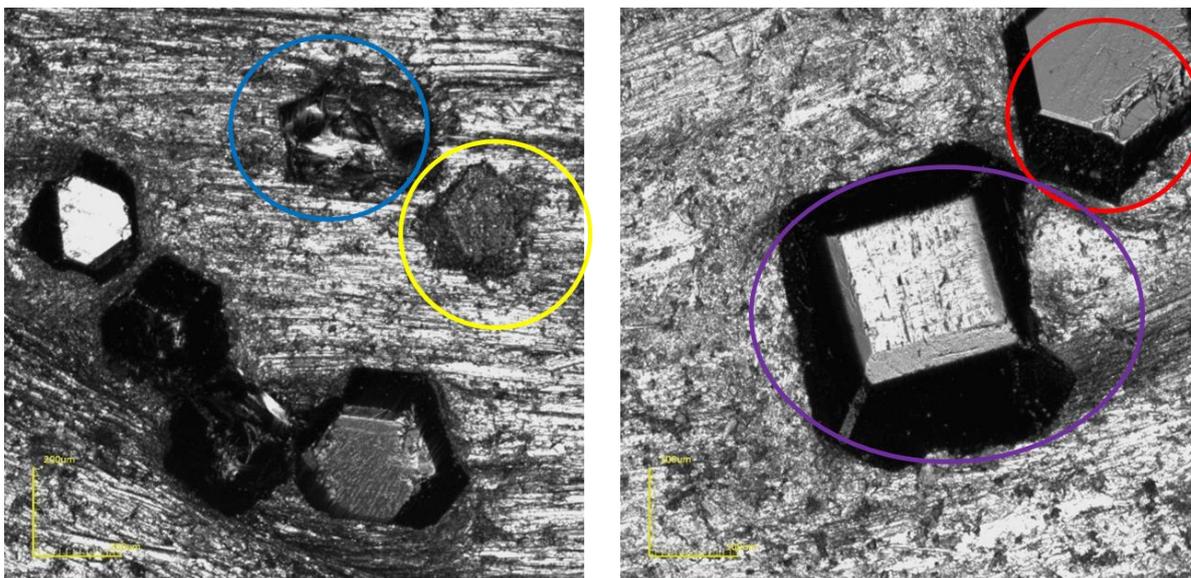


Figura 6463. Microscopia Confocal da pérola B4 após o desgaste.

4.5.2. Dureza

A Tabela 4, mostra os valores médios de dureza para as 4 amostras de cada composição (B1, B2, B3 e B4). Comparando esses valores na Tabela 4, pode-se concluir que as amostras B1 e B4 apresentam maiores valores de dureza. Assim, pode-se dizer que em B1 contendo diamante e B4 contendo ZrC, permitem a produção de um material mais duro.

Tabela 4. Dureza (HB) das amostras B1, B2, B3 e B4.

Pontos	B1	B2	B3	B4
1	91,8	91,6	88,2	90,2
2	90,5	92	89	91,3
3	93,1	87,4	91,5	92
4	92,8	93,8	85,7	91,7
Média	92,05	91,2	88,6	91,3
Desvio	1,17	2,71	2,39	0,78

A Figura 6564 mostra em um mesmo gráfico a dureza de todas as pérolas diamantadas estudadas para um melhor entendimento.

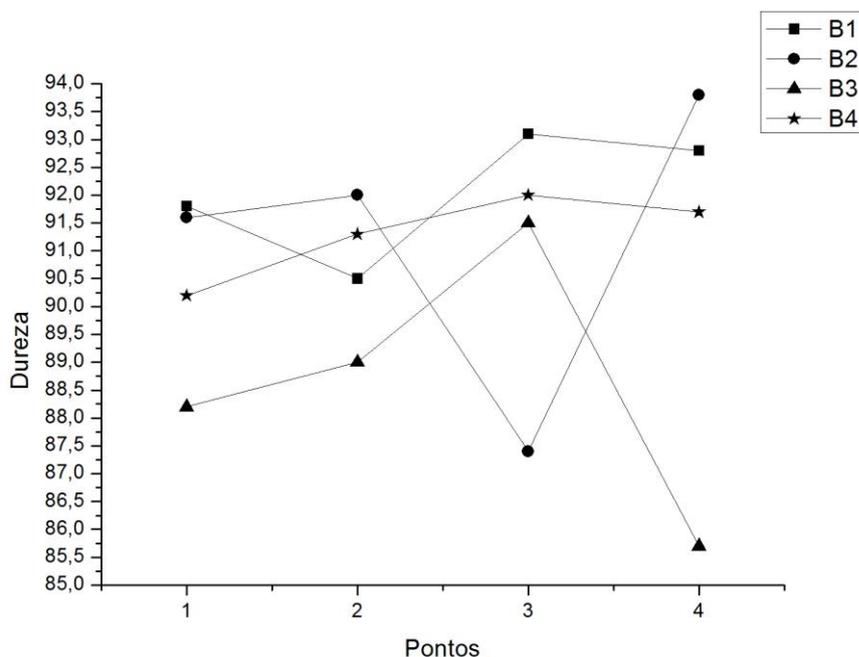


Figura 6564. Gráfico de Dureza Rockwell B das Pérolas diamantadas.

A Figura 6665 apresenta o gráfico dos valores médios das pérolas diamantadas B1, B2, B3 e B4. Todas as pérolas possuem diamante como abrasivo, porém a pérola diamantada B1 contém como abrasivo apenas diamante, justificando o resultado de maior dureza, visto que o diamante é o material de maior dureza. As pérolas diamantadas B2 e B4, possuem um valor de dureza muito próximo.

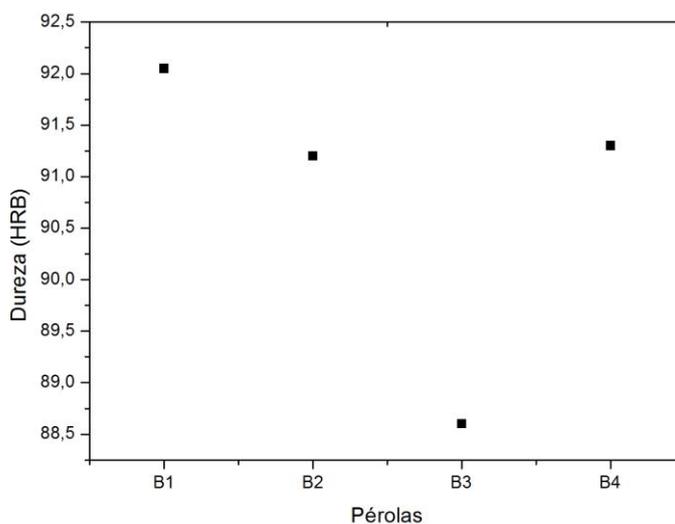


Figura 6665. Gráfico da média da Dureza Rockwell B das Pérolas diamantadas.

4.6. DENSIDADE

A Tabela 5 apresenta resumidamente as densidades teórica (ρ_t), aparente (ρ_a) e relativa (ρ_r) obtidas para as quatro pérolas “verde”.

Observando a densidade relativa (ρ_r) das pérolas após a compactação, verifica-se que as pérolas B1, B2, B3 e B4 apresentaram pouca variação entre si. A maior densidade relativa medida foi da pérola B3, enquanto que a menor densidade relativa foi de B1.

Tabela 5. Densidade das pérolas “verde”.

	Amostra	ρ_a (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	ρ_r (%)
B1	1	4,03	8,06	50
	2	4,24	8,06	52
	3	4,08	8,06	50
	Média	4,11	8,06	51
	Desvio	0,11	0	1
B2	1	4,51	8,06	55
	2	4,46	8,06	55
	3	4,59	8,06	56
	Média	4,52	8,06	56
	Desvio	0,06	0	1
B3	1	5,24	8,06	65
	2	4,54	8,06	56
	3	4,95	8,06	61
	Média	4,91	8,06	60,5
	Desvio	0,35	0	4,5
B4	1	5,06	8,06	62
	2	4,45	8,06	55
	3	4,91	8,06	60
	Média	4,80	8,06	59
	Desvio	0,31	0	3,6

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as quatro pérolas, sinterizadas sob a temperatura de 910 °C. Os dados apresentados na Tabela permitem fazer as seguintes observações.

Tabela 6. Densidade das pérolas sinterizadas.

Amostra	ρ_a (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	ρ_r (%)	
B1	1	7,56	8,06	93
	2	7,37	8,06	91
	3	7,32	8,06	90
	Média	7,42	8,06	91,5
	Desvio	0,12	0	1,5
B2	1	7,51	8,06	93
	2	7,25	8,06	89
	3	6,8	8,06	84
	Média	7,2	8,06	88,6
	Desvio	0,35	0	4,5
B3	1	6,98	8,06	86
	2	7,73	8,06	95
	3	7,28	8,06	90
	Média	7,33	8,06	90,5
	Desvio	0,37	0	4,5
B4	1	7,21	8,06	89
	2	7,83	8,06	97
	3	6,78	8,06	84
	Média	7,27	8,06	90
	Desvio	0,52	0	4,3

Após o processo de sinterização, observa-se que uma maior densificação para a pérola diamantada B1 (91,5%) e uma menor densificação para a pérola diamantada B2 (88,6%) Figura [6766](#).

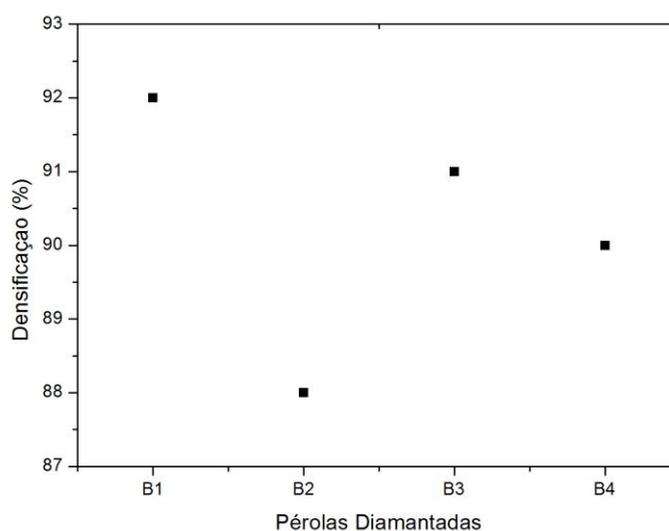


Figura 6766. Comportamento da densificação média das pérolas diamantadas.

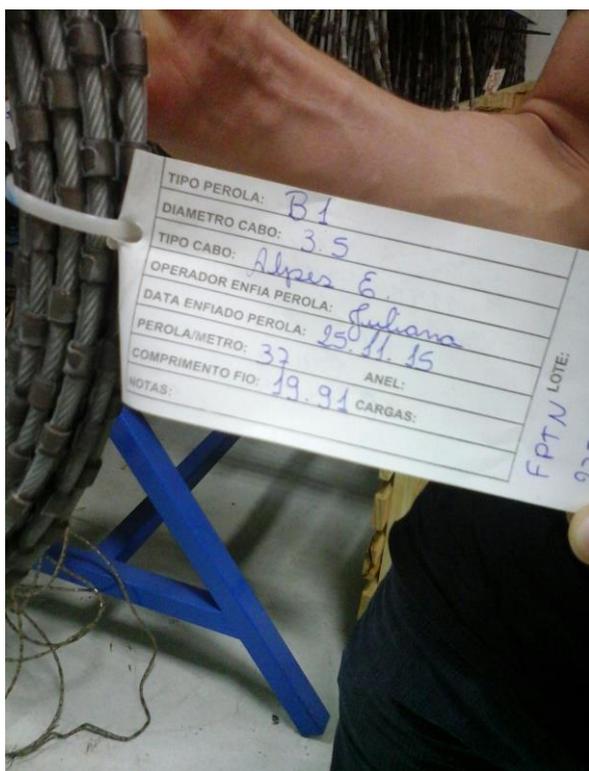
É interessante notar também o efeito benéfico da etapa de preparação e granulação das amostras. Segundo os modelos de Furnas e Andreas mostram a influência da distribuição granulométrica das partículas no fator de empacotamento. Quando existem partículas de tamanhos diferentes, o fator de empacotamento melhora consideravelmente (Almeida, 2012).

Segundo Del Villar *et al.*, (2001) e Oliveira (2010), o principal fenômeno de transporte de massa para a densificação são basicamente limitados pela fase rica em Cu. Este processo de densificação tem duas importantes contribuições. Primeiro, durante a etapa de compactação, onde, devido ao baixo campo de tensões das partículas de Cu e o efeito da concentração de tensão produzido pela presença da segunda fase dura de Fe, o Cu pode alcançar importante deformação plástica e conseqüentemente uma densidade a verde relativamente alta. Segundo, durante a alta temperatura de consolidação, o fluxo plástico para estas partículas de Cu altamente tensionadas é visto como um importante papel para a ativação de mecanismos de transporte de material baseados em difusão.

4.7. FIO DIAMANTADO PRODUZIDO

Uma fotografia do fio diamantado produzido na empresa GT Wire é apresentada pela Figura 6867. Foram produzidos dois fios diamantados, um com as pérolas produzidas de B1 e outro produzido com as pérolas a base de B2.

a) B1



b) B2



Figura 6867. Fotografia dos fios diamantados a) B1 e b) B2 produzidos na empresa GT Wire.

Foram produzidos fios diamantado com 19.91 metros de comprimento. Cada metro de fio possui 37 pérolas diamantadas e o diâmetro do cabo tem 3.5 mm.

4.8. TESTES DOS FIOS DIAMANTADOS SOB CONDIÇÕES REAIS DE SERVIÇO

Neste item, estão apresentados os resultados obtidos para o desempenho dos cabos B1 e B2 que foram utilizados para completar o jogo de 70 fios comerciais, produzidos pela GT Wire. Para facilitar a identificação, os dois cabos foram colocados na extremidade da máquina (Figura 6968). Na Figura 7069 apresenta os detalhes dos fios para o início do teste.

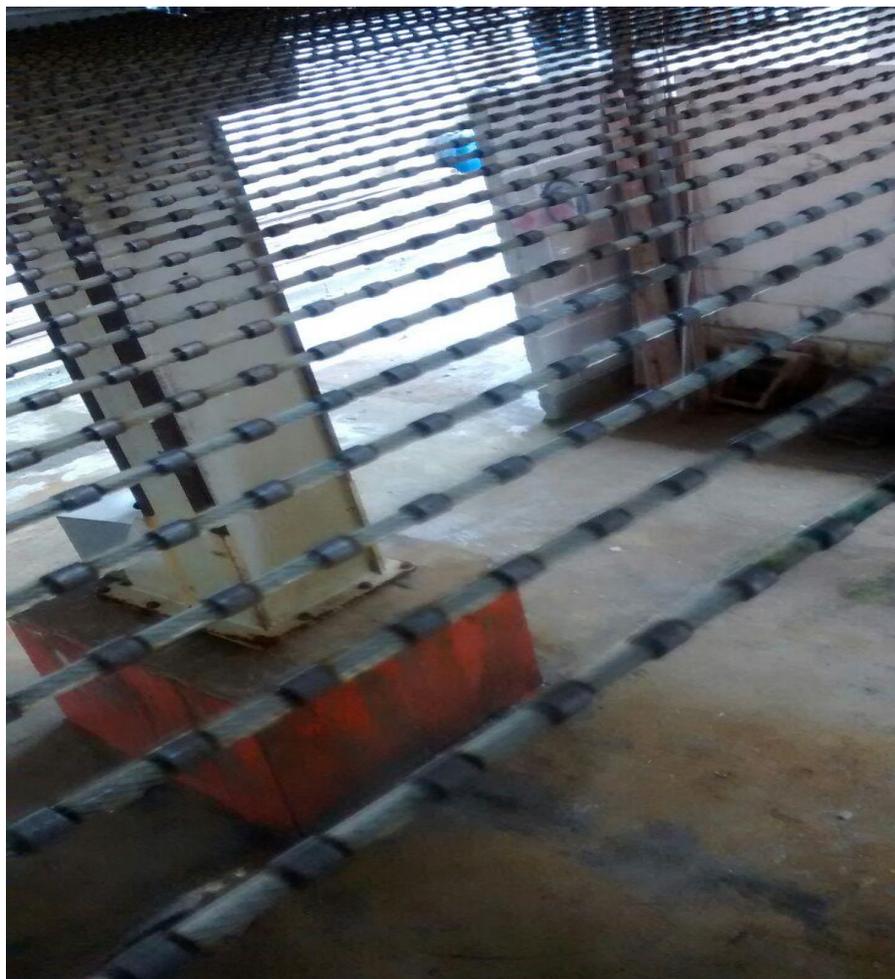


Figura ~~69~~68. Cabos esticados no tear prontos para início do corte.



Figura ~~70~~69. Detalhe das pérolas B1 e B2 prontos para início do teste.

Nos testes de campo foram cortados vários tipos de rochas, como é observado na Tabela 7, bem como a metragem cortada em cada serrada.

Tabela 7. Controle de Produção da empresa GT Wire.

CONTROLE DE PRODUÇÃO											
EMPRESA: PEDRARIO				METRAGEM TOTAL DE FIOS (m):	PRODUÇÃO ATUAL (m²):	RENDIMENTO (m²/metro linear):			OBSERVAÇÕES: TESTE B1 E B2		
TEAR: SOCOMAC 70 FIOS				1393,7	6638,04	4,76					
Corte	Data	Hora Início	Hora Final	Material	Classe de dureza	Medida do Bloco		Qntd. De Chapas	Produção (m²)	Cala (cm/h)	Vel. Perif.
						Comp.	Altura				
412	04/12/2015	21:55	12:30	TOOLON	3	2,85	2,00	51	290,70	22	28,0
413	07/12/2015	15:30	05:00	ORNAMENTAL	3	2,95	1,85	35	191,01	22	29,5
				ORNAMENTAL		2,95	1,90	10	56,05		
414	08/12/2015	09:10	01:30	MADRE PÉROLA	6	3,20	1,85	37	919,97	8	30,0
				MADRE PÉROLA	6	3,20	1,85	7	174,05		
415	14/12/2015	10:00	03:45	TYPHOON BORDEAUX	3	3,00	1,75	66	346,50	25	27,0
416	15/12/2015	05:45	16:10	BLANCK DU BLANCK	3	3,40	1,80	63	385,56	23	30,0
417	15/12/2015	22:00	17:10	TAJ MAHAL	6	3,30	1,90	63	1659,04	7	30,0
418	19/12/2015	01:10	15:00	ORNAMENTAL LIGHT	3	2,85	2,00	44	250,80	19	26,0
				TOOLON	3	2,85	2,00	5	28,50		
419	19/12/2015	16:40	02:50	ÁLAMO	3	3,15	1,95	51	313,27	20	27,0
420	20/12/2015	04:45	13:15	SOLÁRIOS	4	3,05	1,90	47	463,02	23	28,0
421	20/12/2015	16:08	16:00	CRISTALLO	5	2,55	1,85	21	247,67	8	29,0
				BRANCO COTTON	4	3,15	1,90	28	284,89		
422	21/12/2015	23:19	09:00	BIANCO ANTICO	4	3,15	1,80	45	433,76	22	28,0
423	22/12/2015	13:15	12:35	CRISTALLO	5	3,10	1,85	36	516,15	10	30,0
				BRANCO COTTON	4	3,15	1,60	9	77,11		

Como pode ser observada na Tabela 7, a produção total foi de 6638,04 m² para todo o conjunto. Fazendo o cálculo proporcional, chega-se a conclusão que a produção total de B1 e B2 foi de 94,82 m² para cada um dos cabos.

No intervalo entre as serradas foram feitas algumas medições do desgaste, conforme observado na Figura [7470](#) e Figura [7271](#).

Considerando-se o diâmetro inicial da pérola de 7,6 mm pode-se observar que a perda de massa dos cabos B1 e B2 foram menores que as do cabo comercial em termos de diminuição de diâmetro, que pode ser associado a perda de massa. Como observado na Figura [7470](#) (A) e Figura [7470](#) (B), a diminuição do diâmetro para as pérolas B1 e B2 foram de 0,03 e 0,04mm, respectivamente, comparando com a comercial (Figura [7271](#)) que apresentou perda de diâmetro de 0,05mm, pode-se dizer que inicialmente os cabos produzidos foram mais resistentes que o comercial. Embora a diferença de desgaste das pérolas comerciais em relação as testadas neste tese, foi mínima, porém, eventualmente, podem ter sido um dos causadores do rompimento do cabo comercial que resultou do rompimento de todos os outros cabos que estavam no tear.

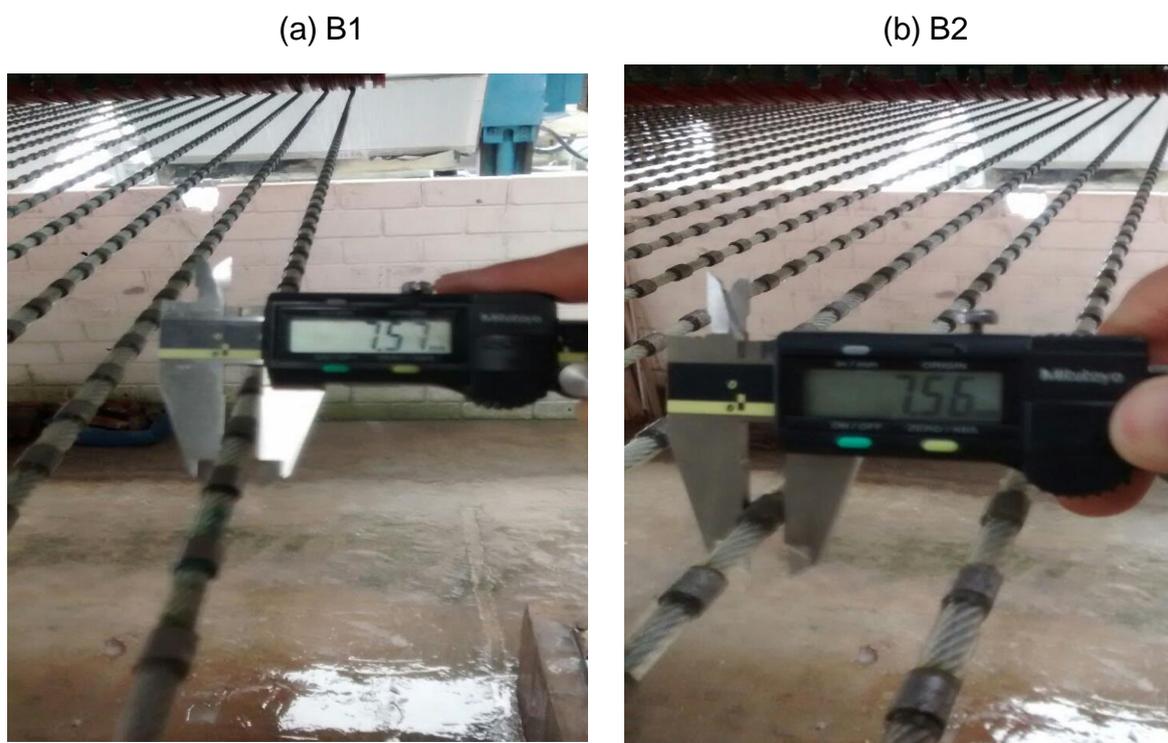


Figura 70. Diâmetro das pérolas (a) B1 e (b) B2 após as serradas.



Figura 71. Diâmetro da pérola comercial após as serradas.

Entretanto, conforme mostrado na Tabela 7, esse jogo de fios executou somente 12 serradas (descidas/corte). Este foi um baixo desempenho, o qual foi motivado pelo fato de que houve rompimento de um ou mais cabos, resultado na inutilização de todo o jogo. Por isso, os cabos de B1 e B2 não atingiram o final da vida útil, uma vez que o diâmetro medido de cada pérola dos cabos de B1 e B2 ficaram em torno de 6 mm. De acordo com informações da empresa o diâmetro final da pérola que caracteriza o final de sua vida útil é de 5,8 mm.

Portanto, caso o rompimento dos cabos não tivessem ocorrido (ressaltando aqui que os cabos B1 e B2 não se romperam, foram os comerciais que se romperam), e tomando como base a tabela fornecida pela empresa, estima-se que esses cabos B1 e B2, poderiam executar mais 6 descidas, aproximadamente, totalizando 18 descidas.

Levando-se em consideração que o cabo com maior rendimento faz 50 serradas e o rendimento previsto seriam 25 serradas, pode-se inferir que os cabos B1 e B2 apresentam boas perspectivas, em função dos resultados apresentados. Na Figura [7372](#) esta apresentada a foto dos cabos após os testes.



Figura 72. Cabos B1 e B2 após as serradas.

Uma das possíveis sugestões para melhoria dos rendimentos desses cabos, é a utilização de diamantes revestidos e também colocar na matriz metálica, uma maior quantidade de agentes controladores de desgaste.

Quanto aos cabos B3 (Figura [7473](#) (a)) e B4 (Figura [7473](#) (b)), por problemas da empresa, cuja descrição fogem ao escopo deste trabalho, não puderam ser testados em condições reais de trabalho.

(a) B3



(b) B4



Figura 73. Cabos (a) B3 e (b) B4 prontos.

CAPITULO 5

CONCLUSÕES

Levando-se em consideração que a 20 anos o grupo de Materiais Superduros da UENF, vem realizando pesquisas para desenvolvimento e nacionalização da tecnologia de fabricação de fio diamantado, pode-se concluir que esta é a primeira tese que efetivamente conseguiu produzir pérolas e cabos diamantados, embora ainda com baixo rendimento, em condições industriais, o que caracteriza o grande avanço tecnológico e científico desta tese.

Para cada composição foram produzidas 750 pérolas para caracterização e produção dos fios B1, B2, B3 e B4. Sendo assim, destacam-se as seguintes conclusões:

- 1) Foi possível sinterizar as amostras B1 e B2 diretamente no tubo de aço da pérola de fio diamantado, eliminando a etapa industrial de brasagem.
- 2) As pérolas B3 e B4 não foram autossoldáveis, portanto estas necessitaram de mais uma etapa industrial para a brasagem das pérolas B3 e B4 ao tubo.
- 3) O mecanismo de desgaste das pérolas estudadas seguiram o padrão clássico de mecanismo de desgaste de uma ferramenta diamantada impregnada, com o desgaste da matriz e surgimento de novos cristais.
- 4) As micrografias obtidas por microscopia confocal, após o processo de desgaste das pérolas diamantadas, permitiram verificar as condições dos cristais de diamante após o desgaste por um tempo de 30 minutos.
- 5) A pérola B4 (com adição de ZrC) apresentou maior resistência ao desgaste no final do teste, o que pode ser justificado pela melhor aderência dos cristais de diamante a matriz.

- 6) A pérola do tipo B3 (com adição de B₄C) apresentou, de acordo com os testes mecânicos, menor dureza quando comparados com as pérolas B1, B2 e B4. O que provavelmente afeta na vida útil da ferramenta;
- 7) Em relação a densificação das pérolas estudadas, a pérola B2 apresentou uma menor densificação quando comparada as outras pérolas B1, B2 e B4. Porém apresentou a segunda maior resistência ao desgaste, provavelmente devido a composição de cBN.
- 8) A pérola B1 apresentou maior valor de dureza e uma menor resistência ao desgaste. Provavelmente, pelo fato dos cristais de diamante não estarem bem aderidos a matriz.
- 9) Foram produzidos os fios diamantados em escala industrial, porém apenas B1 e B2 foram testados em condições reais de corte.
- 10) Nos testes reais de corte, as pérolas B1 e B2 apresentaram menor perda de massa que o cabo comercial. Embora tenha sido mínima a diferença entre o desgaste das pérolas comerciais em relação as testadas na tese, o que, eventualmente, podem ter sido um dos causadores do rompimento do cabo comercial que resultou do rompimento de todos os outros cabos que estavam no tear.
- 11) As pérolas testadas em condições reais de serviço chegaram a cortar 94,82 m² para cada um dos cabos B1 e B2. Porém, os cabos não atingiram o final da vida útil, pois o cabo comercial se rompeu e inutilizou todo o jogo.
- 12) Levando-se em consideração que o cabo com maior rendimento faz 50 serradas e o rendimento faz 25 serradas, pode-se inferir que os cabos B1 e B2 apresentaram boas perspectivas, em função dos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.
Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acessos em: novembro de 2015 e março de 2016.
- Alencar, C. R. C.; Caranassios, A.; Carvalho, D. (1996) Tecnologia de lavra e beneficiamentos de rochas ornamentais. Instituto Euvaldo Lodi, v.3 Estudo Econômico sobre Rochas Ornamentais, Fortaleza – CE, 225p.
- Allibert, C. H. (2001). Sintering of Cemented Carbides WC-Co Processed from fine Powders. International Journal of Refractory Metal e Hard Materials. n. 19, p. 53-61.
- Almeida, L. L. P. (2012) Desenvolvimento de matrizes metálicas no sistema Ni-Fe-Cu-Sn com aditivos para aplicação em serras de corte de rochas ornamentais. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 151p.
- Artini, C.; Muolo, M.L.; Passerone, A. (2011). Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review. Journal of Materials Science. V.47, n.7, p. 3252-3264.
- ASM Handbook (1973). Metallography, Structures and Phase Diagrams. v.8. 8.ed. p. 293.
- ASTM G99, (2016). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
- Azeredo, S.R., (2002). “Processamento de Corôas Abrasivas do Sistema Sílica-Poliéster para Aplicação no Desbaste de Pedras Ornamentais”, Monografia do LAMAV/UENF, p. 32.
- 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.

Bailey M. (1987). The De Beers SDA series of diamond abrasives and its suitability for the stone industry, De-Beers/Eskanazi Seminar, Istanbul.

Bernardes, L. J. L. (2006). A Granulação de Materiais. *Cerâmica Industrial*, 11(3).

Bortolussi, A.; Ciccu, R.; Manca, P. P.; Massacci, G. (1994). Computer Simulation of Diamond-Wire Cutting of Hard Rock and Abrasive Rock, IMM, 103 August, A55A128.

Bundy, F.P., Hall, H.T., Strong, H.M., Wentorf, R.H. (1955). Man-made diamond. *Nature*, 176 (4471), 51-55.

Cabral, S. C.; Oliveira, L.J.; Filgueira, M., (2011). “Estudo do melhor parâmetro de sinterização do ferro (Fe) processado por prensagem a quente (metalurgia do pó)”. *Revista de Ciência e Tecnologia do Vale do Mucuri*. V. 3, p. 74-85.

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.

Chiaverini, V. (1986). *Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento*. São Paulo: Makron Books.

Chiaverini, V. (2001). *Metalurgia do pó*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

Chiodi Filho, Cid; Rodrigues, Eleno de Paula. (2009). *Guia de aplicação de rochas em revestimentos; Projeto Bula / Cid Chiodi Filho; Eleno de Paula Rodrigues*. - São Paulo: ABIROCHAS.

Cimef Metalúrgica. Empresa do setor de metalúrgica, Cachoeiro de Itapemirim. Disponível em: www.cimef.com.br; Acessado em 15/12/2015.

Clapp, D. (1995) Overview of conventional Power Metallurgy Processing, *Advanced Materials e Processes*, nº8, pp. 60-61.

- Clark, I., E.; Kamphuis, B., (2002). Cobalite HDR – A new prealloyed Matrix powder for diamond construction tools. *Industrial Diamond Review*, N. 3, pp.177-182.
- Clark, I.E.; Sen, P.K.. (1998). Advances in the development of ultrahard cutting tools materials. *INDUSTRIAL DIAMOND REVIEW* , 2, 40-44.
- Costa, A., G.; Campelo, M., S.; Maciel, S., L.; Calixto, C.; Bezerra, J., E., (2002). Rochas Ornamentais e de Revestimento: proposta de classificação com base na caracterização tecnológica. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Anais. Recife, pp. 55-59.
- De Châlus, P. A. (1994) Metal Powders for optimum grain retention. *Industrial Diamond Reveiw*, n. 4, 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.
- Diamant Boart , 2008. "Ferramentas diamantadas para a indústria da pedra", Catálogo;
- Element Six (2003) – De Beers – Group of Companies. Disponível em: <http://www.e6.com/wps/wcm/connect/E6_Content_EN/Home>. Acesso em: março de 2016.
- Elsevier, B. V. Scopus. Disponível em: <<http://www-scopuscom.ez24.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 29 nov. 2015.
- Fang, N.; Liu K.; Zuo, D. (1998). Influence of processing conditions on properties of beads of diamond wire saws. *Journal of Materials Science Letters*, Volume 17, Issue 1, pp 69-71.
- Fernandes, M. R. P. (2014) Compósito de Matriz Metálica à Base de Níquel com Adição de TaC e NbC Produzidos via Metalurgia de Pó. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.

- Filgueira, M. (2000). Produção de fios diamantados 'in situ'. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.
- Filgueira, M.; Pinatti, D.G., (2001). "Production of Diamond Wire by Cu 15%v Nb 'In Situ' Process", In: 15th International Plansee Seminar, Reutte/Austria, Plansee Holding AG, v. 1, pp. 360-374.
- 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.
- Fonseca, D. S.; Silva, C. S. (2010) Sumario Mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia.
- Frade, J., R., Paiva, A., T., (2006). Diferenciação de materiais baseada em medições de densidade. Dep. Eng. Cerâmica e do Vidro. Universidade de Aveiro, vol. 1, pp. 1-8.
- Frasca, M. H. B. O. (2001). Qualificação de Rochas Ornamentais e para revestimento de Edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste – Anais, Salvador, p. 128-134.
- Galiotto, A. (2005). Estudo da sinterabilidade de materiais ferrosos contendo elevados teores de sulfetos como aditivos. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Gauthier, E.(1927). Diamond lap. U.S. Patent 1,625,463.
- German, R. M. (1999). Pore size and shape. In: Particle packing characteristics MPIF, chapter 11, New Jersey, USA.
- German, R.M., (1999). "Particle Deformation and Compaction". In: Particle Packing Characteristics MPIF, chapter 9, New Jersey, USA.
- German, R.M. (1996). "Sintering Practice". In: John Wiley & Sons, Sintering Theory and Practice, chapter 10, New York, USA, 1996.

- German R., M., (1985). Liquid Phase Sintering, Plenum Press. Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics, vol. 1, p. 10 – 54.
- Gordeev *et al.* (2004). US patent, US6,709,747, March 23.
- Gordo, E.; Velasco, F.; Antón, N.; Torralba, J. M. (2000). Wear Mechanisms in High Speed Steel Reinforced with (NbC)_p and (TaC)_p MMCs. *Wear*. 239: 251-259.
- Gotardo, L. B., (2008). "Proposta de sistema de controle para máquina de fio diamantado com PLC + inversor de frequência". Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.
- Grupo Setorial de metalurgia do pó (2009). A METALURGIA DO PÓ: alternativa econômica com menor impacto ambiental. Editora Metallum Eventos Técnicos e Científicos. 1ª Ed. Acesso em 18 de dezembro de 2015. Disponível em metalurgia do pó: www.metalurgiadopo.com.br.
- Hassanpour, A.; Kwan, C. C.; NG, B. H.; Rahmanian, Ding, Y. L.; Antony, S. J.; Jia, X. D.; Ghadiri, M. (2009). Effect of granulation scale-up on the strength of granules. *Powder Technology*, 189, 304-312.
- Hughes, E. H. (1980). The early history of diamond tools. *Industrial Diamond Review*, 40(6), 405-407.
- Idemburgo, K. (2012) Estudo do Corte de Rochas Ornamentais Utilizando Disco Diamantado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Jackson, H.C. (1967). "Isostatic Pressing of Powdered Materials". In: Hanser H.H., *New Methods for the Consolidation of Metal Powders*, chapter 2, Plenum Press, New York.
- Jain, S. C.; Rathore, S. S.; Jain, H.K. (2013). "Investigation the Effects Of Machine Parameters On Cutting Performance Of Diamond Wire Saw Machine In Cutting Of Marble Bench". *International Journal of Engineering Research & Technology*, Índia.

- Jones, W.D. (1960). *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. Edward Arnold Publishers Ltd., London, p. 807.
- Johnson, R.E. (2005). Diagramas de fases. (Online) *Metals Handbook*. ASTM Internacional. Disponível em: <http://www.infomet.com.br> (Acessado em 15 de março de 2016).
- Kittel, C. (2006). *Introdução à Física do Estado Sólido*. LTC. 8ed. Rio de Janeiro/RJ, 578p.
- Knewitz, F. L. (2009). Estudo comparativo das amostras de NiTi produzidas por metalurgia do pó. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 60p.
- Konstanty, J. (2005). *Powder Metallurgy Diamond tools*. Krakow, Polônia: Elsevier.
- Konstanty, J., (2003). Production of Diamond Sawblades for Stone Sawing Applications. *University of Mining Metallurgy*, vol. 30, pp. 30-59.
- Konstanty, J. (2001). Diamond Bonding and Matrix Wear Mechanisms Involved in Circular Sawing of Stone. *Industrial Diamond Review*, n.1. p. 55-65.
- Kulikovsky, V., Vorlicek, V., Bohac, P., Ctvrtlik, R., Stranyanek, M., Dejneka, A., Lastrabik, L., (2009). Mechanical properties and structure of amorphous and crystalline B4C films, *Diamond & Related Materials*, v. 18 pp. 27–33.
- Lowell, S. e Shields, J. E. (1984). *Powder Surface and Porosity*. 2 ed. By Scarlet, B. – John Willey & Sons. New York. p. 90-92.
- Ma Q., (2010). Effect of additives introduced by ball milling on sintering behavior and mechanical properties of hot-pressed B4C ceramics, *Ceramics International*. pp. 167–171.
- Machado, D. S. (2009). Desenvolvimento de um compósito diamantado por metalurgia do pó. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais 56 f.
- Monteiro, C. F. F., Silva, J. M., Monteiro, A. C. (2014). Corte de Pedra por Fio Diamantado. VIII Congresso de Engenharia mecânica, Uberlândia MG.

- Moreira Junior, V. (2013). Processamento e caracterização de pérolas de fios diamantados. 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, 166p.
- Moriguchi, H.; Tsuduki, K.; Ikegaya, A.; Miyamoto, Y.; Morisada, Y., (2007). *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 25:237.
- Moro, N.; Auras, A. P. (2007). Processos de Fabricação – metalurgia do pó e o futuro da indústria. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- Nitkiewicz, Z.; Swierzy, M., (2006). *J. Mater. Process. Technol*, vol. 1, p.306.
- Nunes, E. N. (2006). Obtenção de material compósito diamantado via sinterização sob altas pressões e altas temperaturas no sistema diamante-silício. 91f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes/RJ.
- 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.; Filgueira M. (2007) Aplicação de ligas de Fe-Cu-SiC como matriz ligante em ferramentas diamantadas. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*. n. 1, v.26, p.15-20.
- 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) - Universidade Estadual do Norte

Fluminense Darcy Ribeiro - Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 190p.

Ozcelik, Y.; Kulaksiz, S.; Cetin, M. C. (2002). Assessment of the wear of diamond beads in the cutting of different rock types by the ridge regression. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 392-400.

Pacheco P. D.; Oliveira, L. J.; Quintanilha, R.; Guimarães, R. S.; Filgueira, M. (2007). Obtenção de ligas Fe-Cu via metalurgia do pó: Microestrutura, Dureza e limite de escoamento. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v. 26, n. 3, 121-125.

Peiter, C.C.; Chiodi Filho, C. (2001). Rochas Ornamentais no Século XXI: bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Rio de Janeiro: CETEM/ ABIROCHAS, 160p.

Proquest, L. ProQuest: Engineered Materials Abstracts. Disponível em: <<http://search.proquest.ez24.periodicos.capes.gov.br/engineeringmaterialsabstracts/>>. Acesso em: 29 nov. 2015.

Przyklenk, K., (1993). Diamond Impregnated tools – Uses and Production. *Toolmaking*, n.4.

Rao, C. S.; Upadhyaya, G. S. (1998). Powder metallurgy aluminum alloy-silicon carbide composites. *Brazilian Journal of Materials Science and Engineering, International Review of Materials*, 1(1).

Regadas, I. C. M. C., (2006). "Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil". Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Reynolds, G. K., Fu, J. S.; Cheong, Y. S.; Hounslow, M. J.; Salman, A. D. (2005) Breakage in granulation: A review. *Chemical Engineering Science*, 60, 3969-3992.

Ring, T. A. (1996) *Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis*. New York: Academic Press, 204p.

- Shibuta, D. et al (1983). Recovery of Diamond from Diamond Tool Scrap. Mitsubishi Metal Corporation. Japanese Patent.
- Sideris Junior, A. J. (2013) Obtenção e caracterização de compósitos diamantados para aplicação em serras de corte de gnaisses. Tese (Doutorado 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, 170p.
- Tandon, R.; Johnson, J. (1998) Liquid-phase sintering. In: ASM Handbook. Powder metal Technologies and applications. Materials Parks, v.7, 565-573.
- Tolkowsky, M., (1920). D. Sc. Thesis, University of London.
- Tonshoff, H. K.; Apmann, H. H.. (2002). Diamond tools for wire sawing metal components. *Diamond And Related Materials*, 11, 742-748.
- Traina, K.; Cloots, R.; Bontempi, S.; Lumay, G.; Vandewalle, N.; Boschini, F. (2013) Flow abilities of powders and granular materials evidenced from dynamical tap density measurement. *Powder Technology*, 235, 842-852.
- U.S. Navy DTI Wire-Rope Handbook. (1987). "design and engineering of wire rope systems". Naval Sea systems comand Washinton.
- Vidal, F. W. H. (2002). Rochas Ornamentais do Nordeste – Brasil. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Anais, Recife, pp. 146-153.
- Warren, B., (1992). Sense Developments: A contrastive study of the development of slang senses and novel standard senses. *Acta Universitatis Stockholmiensis*, Stockholm: Almqvist & Wiksell.
- Weber, G., Weiss, C., (2005). Diamix – A Family of Bonds Based on Diabase – V21. *Industrial Diamoond Review*, n. 2, p. 28-32.
- Wensheng, L., Zhang, J., Wang, S., Dong, H., Yaming, L., Liu, Y., (2012). Characterizations and mechanical properties of impregnated diamond segment using Cu-Fe-Co. Metal matrix. *Rare Metals*, vol. 31, p. 81.

- Wilks, J., Wilks, E., M., (1979). Abrasion and tear of Diamond, in J.E. Field. Properties of Diamond, Academic Press, London, p. 351-381.
- Wu, Y.; Funkenbusch, P. D. (2010). Microstructure and mechanical properties of commercial, bronze-bond, diamond-abrasive tool materials. Journal Materials Science, v. 45, p.251.
- Yilmazkaya, E.; Ozcelik, Y. (2016). The Effects of Operational Parameters on a Mono-wire Cutting System: Efficiency in Marble Processing - Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Zhang, M.X.; Huang, B.; Hu, Q.D.; Li, J.G. (2012). Study of formation behavior of ZrC in the Cu–Zr–C system during combustion synthesis, Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 31, 230–235.
- Zeren, M., Karagoz, S., (2007). Sintering of polycrystalline diamond cutting tools. Mater. Des., v. 28, p.1055.

APÊNCIDE A – Diagrama de Fases

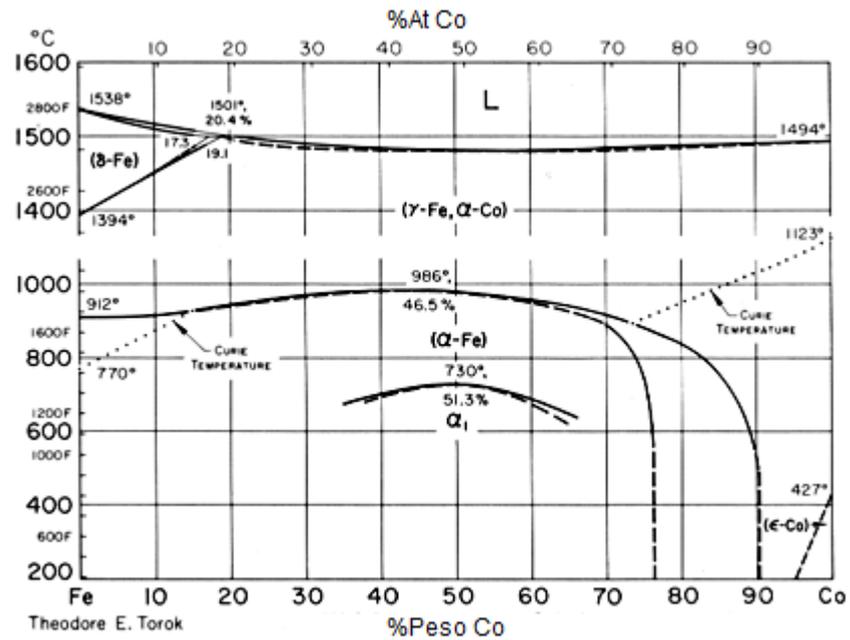


Figura 1. Diagrama de fases do sistema Fe-Co (ASM Handbook, 1973).

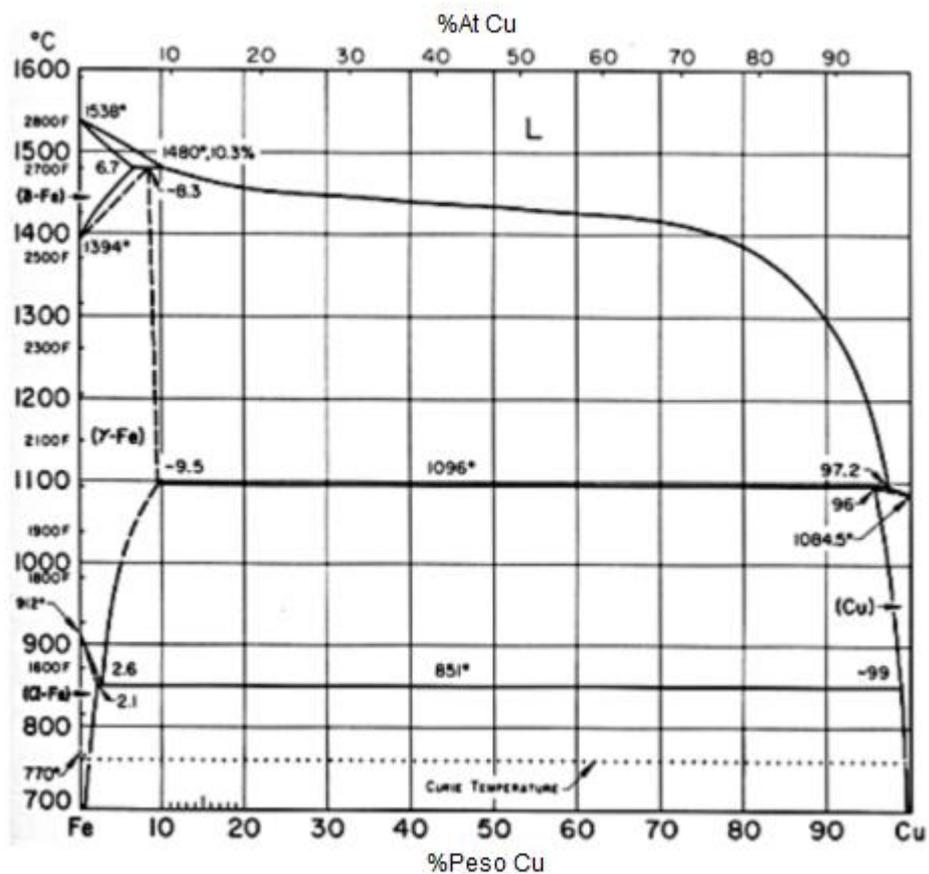


Figura 2. Diagrama de fases do sistema Cu-Fe (ASM, Handbook, 1973).