

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Juan Carlos Valdés
Serra E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 02/04/98.
Helena
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização Mecânico-Metalúrgica de Compósitos Al-NbC, Produzidos por Metalurgia do Pó

Autor: Juan Carlos Valdés Serra
Orientadora: Maria Helena Robert
Co-Orientador: Jesualdo Luiz Rossi

04/98

V233c

34149/BC

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

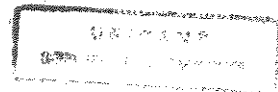
Caracterização Mecânico-Metalúrgica de Compósitos Al-NbC, Produzidos por Metalurgia do Pó

Autor: **Juan Carlos Valdés Serra**
Orientadora: **Maria Helena Robert**
Co-Orientador: **Jesualdo Luiz Rossi**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1998
S.P.- Brasil



2103185

UNIDADE BC
 N.º CHAMADA: Se68c
 V. 34149 E. 395/98
 TONELADA 395/98
 C. 0 ☒
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 05/06/98
 N.º CPD

CM-00112435-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V233c Valdés Serra, Juan Carlos
 Caracterização mecânico-metalúrgica de compósitos
 Al-NbC, produzidos por metalurgia do pó. / Juan Carlos
 Valdés Serra. --Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientadores: Maria Helena Robert, Jesualdo Luiz
 Rossi

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

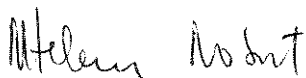
1. Compostos metálicos. 2. Compostos de alumínio.
 3. Metalurgia do pó. 4. Alumínio. 5. Carbonetos. 6.
 Propriedades mecânicas. 7. Desgaste mecânico. I.
 Robert, Maria Helena. II. Rossi, Jesualdo Luiz. III.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Caracterização Mecânico-Metalúrgica de Compósitos Al-NbC, Produzidos por Metalurgia do Pó

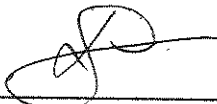
**Autor: Juan Carlos Valdés Serra
Orientadora: Maria Helena Robert
Co-Orientador: Jesualdo Luiz Rossi**



**Profa. Dra. Maria Helena Robert
DEF/FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Walter Contreras Zapata
FEJ/DEM/UDESC**



**Prof. Dr. Roberto de Toledo Assumpção
DEMA/FEM/UNICAMP**

Campinas, 2 de abril de 1998

Agradecimentos

À professora Dra. Maria Helena Robert, pela orientação no desenvolver deste trabalho.

Ao corpo técnico da Faculdade de Engenharia Mecânica, especialmente do DEMA e do DEF, pelo apoio no desenvolvimento experimental do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pela colaboração, consultas e fabricação dos compósitos Al-NbC (5,10,15%), na pessoa do Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi, co-orientador deste trabalho.

À CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) por doar o pó de NbC que foi utilizado na produção dos compósitos.

À professora Dra Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, conjuntamente com o Departamento de Engenharia de Materiais, da Escola de Engenharia de São Carlos (USP-SC), por tornar possível a realização dos ensaios de resistência ao desgaste.

Ao Laboratório de Fibras Ópticas, do Instituto de Física da UNICAMP, na pessoa do Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa e estudante Raúl Cuevas, pelo auxílio na realização dos ensaios de expansão térmica.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, pela oportunidade e apoio.

Aos amigos cubanos e brasileiros de Campinas, por propiciarem bons momentos durante nosso convívio.

À Herta, um especial reconhecimento por estar sempre ao meu lado nos momentos duros, sempre brindando sua imensa ajuda.

Aos professores, funcionários e alunos da FEM/UNICAMP, pela amizade.

A todos aqueles que através de discussões, críticas e sugestões ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

CAPÍTULO 1 1

Introdução e Objetivos 1

 1.1. Introdução 1

 1.2. Objetivos Gerais do Trabalho 6

 1.3. Objetivos Específicos do Trabalho 7

CAPÍTULO 2 8

Introdução aos Compósitos 8

 2.1. Definição e Aplicações 8

 2.2. Principais Propriedades dos Compósitos 11

 2.3. Tipos de Compósitos 13

 2.4. Métodos de Fabricação de Compósitos de Matriz Metálica (CMM)15

 2.5. Produção de Compósitos Particulados via Metalurgia do Pó 19

 2.6. O Compósito Al-NbC 22

CAPÍTULO 3 26

Procedimento Experimental 26

 3.1. Matérias-Primas Utilizadas 26

 3.1.1. Alumínio 27

 3.1.2. Carboneto de Nióbio 30

3.2. Produção dos Compósitos Al-NbC	34
3.3. Planejamento Experimental	36
3.4. Caracterização Metalúrgica dos Compósitos	40
3.4.1. Caracterização Macroestrutural	40
3.4.2. Caracterização Microestrutural.....	41
3.5. Caracterização Mecânica dos Compósitos.....	44
3.5.1. Ensaios de Tração.....	44
3.5.2. Ensaios de Resistência ao Desgaste.....	45
3.5.3. Ensaios de Dureza	49
3.6. Ensaios de Expansão Térmica	51
3.7. Caracterização da Densidade Aparente	53
CAPÍTULO 4	55
Resultados e Discussões	55
4.1. Caracterização Metalúrgica dos Compósitos Al-NbC.....	55
4.1.1. Caracterização Macroestrutural	55
4.1.2. Caracterização Microestrutural.....	60
A) Al sem Reforço	60
B) Compósito Al-NbC (5% vol)	61
C) Compósito Al-NbC (10%vol)	65
D) Compósito Al-NbC (15%vol).....	68
E) Comparação das Microestruturas dos Compósitos Al-NbC (5,10,15% vol)	72
4.1.3. Análise das Partículas do Reforço nos Compósitos.....	73
A) Diâmetros de Partículas do Reforço, no compósito	74

B) Distribuição Macroscópica das Partículas do Reforço.....	78
4.2. Caracterização Mecânica dos Compósitos Al-NbC	82
4.2.1. Comportamento em Tração	82
4.2.2. Considerações Sobre as Propriedades Mecânicas em Tração dos Compósitos Al-NbC.	88
4.2.3. Resistência ao Desgaste.....	91
A) Al sem Reforço	92
B) Compósito Al-NbC (5%vol).....	93
C) Compósito Al-NbC (10% vol)	96
D) Compósito Al-NbC (15% vol)	97
E) Comparação dos Comportamentos ao Desgaste do Al e dos Compósitos Al-NbC (5,10,15% vol)	99
F) Análise do Desgaste pelo Coeficiente de Desgaste.....	102
G) Observação da Superfície de Desgaste	105
4.2.4. Dureza	107
A) Microdureza	107
B) Macrodureza.....	108
4.3. Expansão Térmica	109
4.4. Densidade Aparente.....	111
4.5. Discussões Finais	113
CAPÍTULO 5	117
Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	117
Conclusões	117
Conclusões gerais	120

Sugestões para Trabalhos Futuros.....	121
Referências Bibliográficas.....	122
Bibliografia Adicional Consultada.....	130
Apêndices.....	134
Apêndice I- Programa Utilizado para Análise de Distribuição de Partículas do Reforço	134
Apêndice II- Fundamentos e Definição de Desgaste.....	143
Apêndice III- Fundamentos Teóricos sobre Expansão Térmica	149
Apêndice IV- Resultados dos Ensaios de Tração-Gráficos.....	152
Apêndice V- Resultados dos Ensaios de Tração-Tabela.....	158
Apêndice VI- Resultados do Ensaio de Desgaste.....	159
Apêndice VII- Resultados experimentais de Micro e Macrodureza....	164
Apêndice VIII- Resultados Experimentais de Expansão Térmica	167
Apêndice IX- Resultados Experimentais de Densidade Aparente	169

Resumo

SERRA, Juan Carlos Valdés, *Caracterização Mecânico-Metalúrgica de Compósitos Al-NbC, Produzidos por Metalurgia do Pó*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 170 p. Dissertação (Mestrado)

O presente trabalho apresenta a caracterização mecânico-metalúrgica de compósitos constituídos de Al reforçado com 5, 10 e 15%vol de partículas NbC, fabricados por metalurgia do pó, e no estado extrudado. A caracterização metalúrgica envolveu a análise do efeito do processamento na estabilidade das partículas de NbC, a análise de sua distribuição macroscópica na estrutura dos compósitos e a análise de interfaces reforço/matriz por MEV. Os resultados obtidos mostraram que as partículas de NbC podem sofrer fratura durante processamento, mas não têm alteradas suas dimensões; reações de interface não foram observadas e uma homogênea distribuição macroscópica das partículas de reforço foram obtidas nos compósitos, embora microscópicamente tenha sido observada tendência à aglomeração de partículas com o aumento do teor de reforço utilizado. Os compósitos foram também caracterizados quanto à expansão térmica e densidade aparente. Os resultados obtidos indicam redução do coeficiente de dilatação linear do Al da ordem de 17. a 26.% com a adição de teores de NbC de 5 a 15%vol, respectivamente; e aumento na densidade aparente da ordem de 15 a 20% para as mesmas adições. Quanto à caracterização mecânica, foram efetuados testes de macrodureza, resistência à tração à temperatura ambiente e desgaste em quatro diferentes condições (duas diferentes superfícies abrasivas e duas diferentes cargas). Os resultados obtidos mostraram aumento da dureza (HB) da ordem de 20 a 40% com o aumento do teor de reforço de 5 a 15%vol NbC no Al; aumento do limite de resistência com o aumento do teor de reforço (variações de 20 a 27%, com relação ao Al); aumento do limite de escoamento para os compósitos com relação ao Al, mas incrementos decrescentes com o aumento do teor de reforço (46 a 22%, respectivamente para 5 a 15%vol NbC); redução do alongamento e da estricção com o aumento do teor de reforço (reduções de 4 a 43% e de 32 a 90%, com relação ao Al sem reforço, com o aumento de NbC de 5 a 15%vol no compósito). Quanto ao comportamento de desgaste, os resultados mostraram a redução do coeficiente de desgaste com o aumento do teor de reforço (variações de 20 a 80% com relação ao Al, quando adicionados 5 a 15%vol do reforço NbC). Os resultados obtidos neste trabalho permitem apresentar um novo e já caracterizado material, incrementando a gama de materiais disponíveis para fins específicos em engenharia.

Palavras Chave

Compósitos de Matriz Metálica, Metalurgia do pó, Alumínio, Carboneto de Nióbio, Propriedades Mecânicas, Desgaste.

Abstract

SERRA, Juan Carlos Valdés, *Caracterização Mecânico-Metalúrgica de Compósitos Al-NbC, Produzidos por Metalurgia do Pó*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 170 p. Dissertação (Mestrado)

The work deals with the metallurgical and mechanical characterization of composites Al-NbC containing 5, 10 and 15% vol of NbC particles, in the extruded condition. Composites were produced from Al 1100 and NbC powders (average powder diameter 25 and 2,3 μm , respectively), and subsequently extruded to bars. Metallurgical characterization involved the analysis of the stability of reinforcement particles and their macroscopic distribution within the matrix as well as the analysis of particles/matrix interface by MEV. Results showed that fracture can occur in the particles of NbC at some extent; no interface reactions and changes in particles dimensions were observed. Homogeneous macroscopic distribution of NbC particles was obtained in all cases; therefore, microscopically it could be observed agglomeration of NbC as its vol fraction increases. It was also characterized thermal expansion and apparent density. Results showed decrease in the coefficient of linear thermal expansion in the order of 17 to 26% related to Al alone, as NbC content increases from 5 to 15% vol, respectively; and an increase of 15 to 20% in apparent density, for the same conditions. Mechanical characterization involved tensile tests at room temperature, Brinell hardness and wear behavior at different conditions. Obtained results showed: tensile strength increases as NbC content increases, from 20 to 27% related to the value obtained for Al with no additions; yield strength is higher than the value for Al alone, but the increment related to Al decreases as NbC content increases (46 to 22%, respectively for 5 and 15%vol NbC); concerning the elongation, increasing NbC content from 5 to 15% leads to a decrease of 4 to 43%, respectively, in this property. Percentage of area reduction decreases as reinforced content increases: increasing NbC content from 5 to 15% leads to a reduction of 32 to 90% in this property related to Al. Results obtained for wear tests showed significant reduction on wear behavior with the presence of the hard NbC particles in the ductile Al matrix: values of wear coefficient 22 to 80% lower than that for Al were observed. As far as hardness is concerned, increasing NbC content from 5 to 15% vol, leads to 19 to 40% increase in this property. General results obtained in this work permit to present a new and already characterized material, enlarging the family of composite materials available for specific engineering purposes.

Key Words

Metal Matrix Composite, Powder Metallurgy, Aluminum, Niobium Carbide, Mechanical Properties, Wear.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Etapas para produção e processo de purificação do Nb metálico: Extração, Redução e Purificação/ Consolidação/ Fabricação do Nb.	25
Figura 3.1-Morfologia do pó de Alumínio AA 1100, utilizado no trabalho.....	28
Figura 3.2-Gráfico da distribuição em porcentagem, do tamanho de partículas do pó de Alumínio AA 1100.	29
Figura 3.3-Resultados da análise química do NbC, realizado pelo método de difração de raios X.....	31
Figura 3.4-Fotografias em MEV do pó de Carboneto de Nióbio (NbC), utilizado no trabalho.	32
Figura 3.5- Gráfico da distribuição em porcentagem, do tamanho de partículas do pó NbC.	33
Figura 3.6-Processo de obtenção dos compósitos Al-NbC, via metalurgia do pó e extrusão.	35
Figura 3.7- Fluxograma das etapas envolvidas no planejamento experimental.	38
Figura 3.8-Indicação de corte dos corpos de prova para análise macroestrutural dos compósitos Al-NbC.	41
Figura 3.9- Indicação de corte de amostras para análise microestrutural dos compósitos Al-NbC.	42
Figura 3.10-Esquema representativo dos corpos de prova para ensaios de tração, segundo norma ASTM E8-96.	45
Figura 3.11-Equipamento utilizado no ensaio de resistência ao desgaste, indicando os vários componentes.	47
Figura 3.12-Indicação de corte de amostras para o ensaios de resistência ao desgaste.....	48
Figura 3.13. Indicação de corte de amostras para o ensaios de dureza.	50
Figura 3.14. Marca feita pelo penetrador na matriz de Al, no ensaio de microdureza na matriz dos compósitos Al-NbC.	51
Figura 3.15- Indicação de corte de amostras para o ensaios de expansão térmica.	52

Figura 3.16-Fotografia do analisador termomecânico marca SHIMADZU, modelo TMA-50, utilizado no trabalho.	54
Figura 4.1-Macroestruturas do compósito Al-NbC (5% vol); corte longitudinal de três regiões diferentes da barra extrudada: a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.....	56
Figura 4.2-Macroestrutura do compósito Al-NbC (10% vol); corte longitudinal de três regiões diferentes da barra extrudada: a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.....	58
Figura 4.3-Macroestrutura do compósito Al-NbC (15% vol); corte longitudinal de duas regiões diferentes da barra extrudada: a) meio b) extremidade final	59
Figura 4.4-Microestrutura do Al-barra extrudada a partir de pó compactado. (Microscopia Ótica: MO)	60
Figura 4.5-Microestrutura do compósito Al-NbC 5% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO) a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.....	62
Figura 4.6-Microestrutura típica do compósito Al-NbC 5% vol: a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe de interface matriz/reforço. (MEV).....	63
Figura 4.7-Microestrutura do compósito Al-NbC 5% vol: indicando pontos de microanálise.(MEV)	64
Figura 4.8-Microestrutura do compósito Al-NbC 10% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO) a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.....	66
Figura 4.9-Microestrutura típica do compósito Al-NbC 10% vol: a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe de interface matriz/reforço. (MEV)	67
Figura 4.10-Microestrutura do compósito Al-NbC 15% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO). a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.....	70
Figura 4.11-Microestrutura típica do compósito Al-NbC 15% vol: a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe de interface matriz/reforço. (MEV).....	71
Figura 4.12-Microestrutura do compósito Al-NbC 15% vol: indicando pontos de microanálise.(MEV)	72
Figura 4.13 Distribuição de valores de diâmetros de partículas de reforço nos compósitos: a) Al-NbC (5% vol), b) Al-NbC (10% vol), c) Al-NbC (15% vol).	77
Figura 4.14. Distribuição do número de partículas do reforço nos compósitos: a) Al-NbC 5% vol; b) Al-NbC 10% vol; c) Al-NbC 15% vol	80

Figura 4.15- Comportamento das contagens de partículas de NbC para os diferentes compósitos Al-NbC (5%,10,15%vol).....	81
Figura 4.16- Variação do limite de resistência (LR) do Al e os compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.....	84
Figura 4.17- Variação do limite de escoamento (LE) a 0,2% de deformação (LE) do Al e compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.....	85
Figura 4.18- Variação alongamento porcentual (A) do Al e compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.....	87
Figura 4.19- Variação da estricção porcentual do Al e compósitos Al-NbC com teor de NbC.	88
Figura 4.20 - Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do Al, em função do percurso.	93
Figura 4.21- Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do compósito Al-NbC (5%vol), em função do percurso.	95
Figura 4.22- Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do compósito Al-NbC (10% vol), em função do percurso.	97
Figura 4.23- Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do compósito Al-NbC (15% vol), em função do percurso.	98
Figura 4.24- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 220-carga 300g.....	100
Figura 4.25- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 320-carga 300g.....	101
Figura 4.26- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 220-carga 506g.....	101
Figura 4.27- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 320-carga 506g.....	102
Figura 4.28- Comportamento do coeficiente de desgaste (W), nos diferentes materiais ensaiados, em função da porcentagem de reforço, para quatros condições analisadas.	104
Figura 4.29- Fotografias das superfícies de desgaste dos diferentes compósitos. Na condição carga 300g e lixa 220. a) Al-NbC 5% b) Al-NbC 10% c) Al-NbC 15%.....	106

Figura 4.30- Comparação entre as microdurezas da matriz de Al e do reforço NbC.	108
Figura 4.31- Comportamento da dureza (HB) dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e do AL.	109
Figura 4.32- Curva típica de dilatação x temperatura dos materiais analisados. (caso específico do compósito Al-NbC 10%vol, desde a temperatura ambiente até 400 °C.	110
Figura 4.33- Variação do coeficiente de expansão térmica com teor de reforço nos compósitos Al-NbC e no Al.	111
Figura 4.34- Comportamento da densidade aparente dos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol) e do Al sem reforço.....	113

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Reservas mundiais de pirocloro. (GUIMARÃES, 1987).....	24
Tabela 3.1-Composição química do pó de Alumínio AA 1100, segundo análise feita pela ALCOA (Poços de Calda).....	27
Tabela 3.2-Resultados da caracterização granulométrica do pó de alumínio AA1100.....	30
Tabela 3.3-Indexação dos picos de difração de raios X do NbC com estrutura CFC e parâmetro de rede $a_0=0,444$ nm.	31
Tabela 3.4. Resultados da caracterização granulométrica do pó de NbC....	34
Tabela 3.5-Composição química da solução utilizada no ataque eletroquímico dos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol)	42
Tabela 4.1- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (5%vol).	64
Tabela 4.2- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (10%vol).	68
Tabela 4.3- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (15%vol).	69
Tabela 4.4- Microanálise gerais dos compósito Al-NbC (15%vol).	73
Tabela 4.5- Resultados da contagem de partículas em trinta áreas diferentes de cada compósito Al-NbC (5, 10, 15% vol), classificadas de acordo com seu diâmetro equivalente.	74
Tabela 4.6- Contagem do número de partículas NbC por área de $0,38 \text{ mm}^2$ analisada, nos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol).....	79

Tabela 4.7- Resultados dos ensaios de tração nos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e no Al extrudado.	83
Tabela 4.8- Comparação das propriedades mecânicas de compósitos extrudados Al-NbC e Al-SiC*. Resultados de Mourisco (1995).	90
Tabela 4.9- Valores médios da variação da massa (Δm) do Al em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.	92
Tabela 4.10 - Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC (5% vol) em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.	94
Tabela 4.11 - Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC (10% vol) em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.	96
Tabela 4.12- Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC 15% vol em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.	98
Tabela 4.13- Valores médios do coeficiente de desgaste (W) dos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol) e do Al, para quatro condições diferentes de ensaios.	103
Tabela 4.14- Valores de microdureza da matriz e do reforço nos compósitos Al-NbC produzidos.	107
Tabela 4.15- Valores de macrodureza dos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol) e do Al sem reforço.	108
Tabela 4.16- Coeficientes de expansão térmica dos compósitos Al-NbC.	110
Tabela 4.17- Densidades aparentes dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e do Al sem reforço.	112
Tabela 4.18- Resumo das propriedades dos compósitos Al-NbC.	114
Tabela 4.19- Variações percentuais de propriedades do Al quando é reforçado com NbC e obtido via metalurgia do pó, em forma de barra extrudadas.	115

Nomenclatura

Letras Latinas

A $\Rightarrow$ Alongamento

W $\Rightarrow$ Coeficiente de desgaste

Z $\Rightarrow$ Estricção

Letras Gregas

$\alpha \Rightarrow$ Coeficiente de expansão térmica linear

$\rho \Rightarrow$ Densidade aparente

Abreviações

CMM $\Rightarrow$ Compósitos de Matriz Metálica

LE $\Rightarrow$ Limite de Escoamento

LR $\Rightarrow$ Limite de Resistência

Símbolos químicos

Al $\Rightarrow$ Alumínio

Al₂O₃ $\Rightarrow$ Alumina

B $\Rightarrow$ Boro

C $\Rightarrow$ Carbono

Cr $\Rightarrow$ Cromo

Nb $\Rightarrow$ Nióbio

NbC $\Rightarrow$ Carboneto de Nióbio

Ni $\Rightarrow$ Níquel

SiC $\Rightarrow$ Carboneto de Silício

Ti $\Rightarrow$ Titânio

CAPÍTULO 1

Introdução e Objetivos

1.1. Introdução

Desde que o homem surgiu na face da Terra, o mesmo tem se utilizado de materiais para garantir sua sobrevivência e conforto. A necessidade de alimentação, moradia, vestimentas, veículos de transporte, armas, etc., fez com que o ser humano recorresse aos mais diferentes tipos de materiais ao longo de sua existência. No início foram utilizados materiais disponíveis, limitados a recursos que a natureza oferecia tais como: ossos, madeira, pedra, barro, etc.

A curiosidade e a inteligência humana possibilitaram a transformação de matérias primas naturais em materiais compostos ou conjugados, que passaram a suprir mudanças de hábitos e suas conseqüentes necessidades. Esta possibilidade fez com que a evolução das tecnologias criadas pelo Homem fosse acelerada, pois o avanço tecnológico é fortemente dependente da disponibilidade de materiais com propriedades e desempenho adequados.

O processo de seleção de materiais para determinadas aplicações envolve um compromisso entre as propriedades desejadas e as características específicas dos materiais disponíveis. A medida que as aplicações tornam-se

mais sofisticadas, as dificuldades de encontrar um único material que satisfaça todas as expectativas aumentam. Este dilema tem obrigado o Homem a conjugar diferentes materiais, que através de suas propriedades, possam alcançar as características finais desejadas.

Embora o processo de conjugação de materiais com diferentes características químicas tenha entrado em evidência tecnológica na metade do século XX, com a evolução do setor aeroespacial, este tipo de alternativa tem sido utilizada desde os primórdios da humanidade.

Nessa conjugação de materiais, cientificamente denominados compósitos, podem ser agregados materiais de distintas naturezas como fibras contínuas, particulados, pós de materiais cerâmicos (B, C, Al_2O_3 , TiB_2 , SiC, TiO_2 , e outros), (BALASUBRAMANIAN, 1990) ou fibras vegetais naturais, cinzas, argilas, areias silicosas e pós de concha marítimas, (ROHATGI, 1990 e 1994) com materiais metálicos ou poliméricos; entre eles destaca-se a área da ciência que se dedica a estudar particularidades dos compósitos com matriz metálica, dadas as implicações tecnológicas que encontra na engenharia.

Inúmeras são as utilidades dos compósitos de matriz metálica (CMM), dependendo da diversidade de combinações e suas decorrentes propriedades; as possibilidades de produtos resultantes e suas conseqüentes aplicações são um campo aberto à imaginação.

Os CMM, com desenvolvimento crescente nos últimos anos, apresentam propriedades que a cada dia leva-se a estudar e testar seus novos comportamentos, utilizando de forma geral ligas de reduzido peso e alta ductilidade, reforçadas com fibras e partículas de natureza diversa que lhes fornecem elevada resistência mecânica, alta resistência ao desgaste e em alguns casos estabilidade térmica, muito acima das propriedades dos materiais que lhes deram origem.

A grande maioria dos CMM produzida e já utilizada comercialmente é do tipo compósitos reforçados por adição envolvendo as ligas leves e dúcteis

baseadas em Al ou Mg, e do tipo sinterizado, no caso de matrizes de mais alto ponto de fusão como ligas de Ti e Ni, (BRACKE, 1983).

Uma das principais metas no projeto de CMM é diminuir a sensibilidade à trincas e falhas com aumento da resistência estática e dinâmica. O aumento na resposta ao carregamento dinâmico nestes materiais é obtido pela absorção do carregamento pela parte elástica do compósito ao invés da deformação plástica do metal a qual poderia ocasionar cumulativos danos no material. Matrizes dúcteis como ligas de Al, Ti e Ni-Cr absorvem energia durante o impacto por deformação plástica, fator muito importante em aplicações dinâmicas e estruturais nos compósitos. Com esta ductilidade da matriz, evitam-se trincas e concentrações de tensões que levariam à fratura frágil dos materiais compósitos, segundo BROUTMAN (1974).

Outras importantes contribuições dos compósitos são as melhorias das propriedades magnéticas, elétricas e anti-fricção. Como exemplo, podem-se citar os componentes diversos na indústria aeronáutica e automobilística, utilizando Al e ligas reforçadas com Al_2O_3 ; contadores e condutores elétricos feitos com Ag e ligas reforçadas de SiC, placas de baterias isolantes acústicos de Pb com fibras de vidro, supercondutores de Ni, Cu, Ag reforçados com Nb, entre outras aplicações. (BROUTMAN, 1974; CHAWLA, 1987; ROHATGI, 1990)

A diversidade dos materiais envolvidos na obtenção do compósito é responsável pelos principais problemas apresentados em sua produção, alguns destes devem-se à aleatoriedade na distribuição do reforço; ausência de molhamento do reforço pela matriz ou excessiva reação do reforço com a matriz.

O problema da irregularidade na dispersão do reforço na matriz metálica devido à diferença de densidades dos dois constituintes e à movimentação das fibras ou partículas durante o processamento, resultam em compósitos com

pobres e anisotrópicas propriedades, segundo estudos realizados por CORNIE (1986); LI (1990); CARVALHO (1992).

Quanto à falta de molhamento entre o reforço e a matriz, a qual pode comprometer seriamente o comportamento do compósito, muitos são os pesquisadores que apresentam soluções que podem minimizar o problema. Por exemplo, METCALFE (1974); DUDEK (1990), utilizam revestimentos metálicos de Ni ou Cr em fibras de Al_2O_3 ou SiC, elaborados por processos sofisticados de deposição a partir de vapores ou plasmas, para reforçar ligas de Al ou Ti, melhorando com isto consideravelmente a interação reforço/matriz. A pré-oxidação de fibras de SiC para a formação de uma camada superficial de SiO_2 , mais molhável pelo Al permite também uma boa interação entre os constituintes do compósito. (LAURENT 1987)

Quando existe um excesso na reação entre o reforço e a matriz, promovendo a degeneração do reforço e a formação de produtos danosos às propriedades do material, as soluções em alguns casos disponíveis também envolvem operações sofisticadas e dispendiosas. Como exemplo típico pode ser citada a alta reatividade entre Al e C a elevadas temperaturas, formando o carboneto frágil Al_4C_3 na interface reforço/matriz. Esta elevada reatividade restringe os processos de fabricação de compósitos Al/C a ligas eutéticas ou a processos que não envolvam o metal no estado líquido, como por exemplo a compressão de fibras impregnadas de Al por deposição. (ASANUMA, 1984)

A escolha do processo de fabricação, associada ao perfeito controle de parâmetros de processamento permitirá, para cada sistema matriz/reforço específico, a apropriada reação de interface e conseqüentemente, a adequada interação entre os constituintes.

Durante a solicitação mecânica do material compósito, quando esforços devem ser transferidos da matriz ao reforço, a presença de interfaces imperfeitas pode ocasionar um fenômeno muito comum em compósitos fibrados: o despregamento do reforço, como conseqüência da sua má interação com a matriz, no caso de não haver molhamento do reforço pelo metal líquido.

Por outro lado, o excesso de interação entre a matriz e o reforço pode provocar a formação de fases frágeis indesejáveis na interface matriz/reforço, levando à fragilização do compósito.

Um processamento de compósito muito usado ultimamente são as técnicas de metalurgia do pó, envolvendo a compactação de matrizes e reforços na forma de pós a partir do estado sólido. Nestas a adesão das partículas de pó (reforço/matriz) é promovida por aquecimento e compactação a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão, diminuindo com isto a reação de interface e interação entre a matriz e o reforço. (VINSON, 1975).

Assim, produzindo compósitos pelo método de metalurgia do pó, o problema da interface é diminuído, e ainda conseguindo-se uma maior homogeneidade na distribuição do reforço e melhor reprodutibilidade de propriedades. (MOURISCO, 1996).

Os reforços cerâmicos tais como SiC, B, C, Al_2O_3 , TiB_2 , etc., são muito utilizados atualmente na fabricação de compósitos de matriz metálica. A proposta deste trabalho é ampliar esta gama de reforços cerâmicos adicionando o NbC (Carboneto de Níbio) em matriz de Al puro. Com esta conjugação espera-se aumentos em algumas propriedades do compósito, como resistência ao desgaste, estabilidade térmica à temperatura elevadas, etc., em comparação a compósitos já conhecidos como Al e ligas/SiC. O NbC apresenta características interessantes, tais como ponto de fusão elevado (da ordem de 3500 °C), porém com um coeficiente de expansão térmica pequeno, questão importante em aplicações a altas temperaturas, e elevada dureza.

Com a associação destas características do reforço com uma matriz dúctil e de reduzido peso, e além disso, com a utilização de um processo de fabricação do compósito via metalurgia do pó, espera-se obter propriedades interessantes no novo compósito Al/NbC, incrementando assim a diversidade de CMM destinados a funções específicas.

Buscando dar continuidade ao desenvolvimento dos CMM ao investigar outras possíveis combinações, este trabalho trata da caracterização mecânico-metalúrgica de compósitos Al-NbC, produzidos por metalurgia do pó.

É importante ressaltar que não há na literatura especializada referências à utilização do NbC como reforço do Al, apesar das potencialidades inferidas de suas propriedades físicas.

A análise dos compósitos constituídos de Al e NbC, ambos materiais relativamente abundantes no Brasil, abre um caminho ainda inexplorado por pesquisadores da área.

Finalmente o comportamento do compósito estudado é comparado aos compósitos Al-SiC, com respeito ao comportamento em tração.

1.2. Objetivos Gerais do Trabalho

Levando em conta a importância crescente dos materiais compósitos e a necessidade de satisfazer as exigências de boa qualidade e elevadas propriedades mecânicas dos produtos fabricados com estes materiais, o presente trabalho tem por objetivos gerais contribuir no desenvolvimento dos CMM, estudando a conjugação entre o Al e o NbC como fase reforçante, ambos, como já foi dito, abundantes no Brasil. Esta junção significa um novo compósito, nunca antes analisado por pesquisadores da área.

Deste novo compósito Al-NbC, espera-se propriedades com potencialidades de utilização elevadas, dadas às características específicas de cada material constituinte: matriz dúctil e de reduzido peso (Al), reforçada por partículas cerâmicas duras e de baixo coeficiente de expansão térmica (NbC), os quais devem fornecer elevada resistência mecânica, estabilidade térmica, resistência ao desgaste ao compósito resultante.

Serão estudados três frações volumétricas diferentes do reforço adicionadas à matriz de Al: (5, 10 e 15%) de NbC, assim como também o Al

sem reforço, processados da mesma maneira que os compósitos, o qual servirá de base comparativa nas análises.

Os objetivos gerais do trabalho serão alcançados através do estudo e análise dos objetivos específicos que compreendem a caracterização das propriedades mecânico-metalúrgicas dos compósitos.

1.3. Objetivos Específicos do Trabalho

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Caracterização metalúrgica de cada compósito obtido de Al-NbC, a 5, 10 e 15% vol de NbC, em termos de :
 - Macroestrutura
 - Microestrutura
 - Distribuição do Reforço
- b) Caracterização do comportamento mecânico em tração, determinando:
 - Limite de Escoamento
 - Limite de Resistência
 - Alongamento
 - Estricção
- c) Comportamento da resistência ao desgaste, analisando coeficiente de desgaste (W), em diferentes condições de abrasão.
- d) Testes de microdureza e macrodureza.
- e) Características térmicas, por meio de ensaios de expansão térmica, especificamente analisando o coeficiente de expansão térmica para cada compósito em função do aumento de temperatura.
- f) Caracterização da densidade aparente dos compósitos.

CAPÍTULO 2

Introdução aos Compósitos

2.1. Definição e Aplicações

A maioria dos termos científicos tem sua origem na língua inglesa e o mesmo ocorre com os compósitos. O termo *Composite Materials* é usado para definir a conjugação de materiais a fim de alcançar propriedades específicas desejadas em determinado produto final.

No Brasil, a princípio, o termo mais adequado e aceito para traduzir *Composite Materials* foi *Materiais Conjugados*; o termo caiu em desuso pois leva a uma abrangência muito ampla, dificultando padrões técnico-científicos.

Passou-se então a adotar o termo material compósito ou simplesmente compósitos. A definição de compósito é também bastante flexível; podendo-se citar aqui a definição de CHAWLA (1987):

“Um material compósito se constitui de uma combinação de materiais com propriedades dissimilares, produzido de maneira que se possa controlar a dispersão de um componente em outro e com o objetivo de se obter propriedades particulares e superiores às dos componentes isolados, apresentando no mínimo, dois componentes: a matriz e o reforço.”

Os materiais compósitos para aplicações mais sofisticadas só apareceram em larga escala na primeira metade do século XX. Dentre os mais antigos materiais compósitos destacam-se as combinações polímeros-cerâmicas, sendo mais popularmente conhecidos os constituídos de resinas poliméricas reforçadas com fibras de vidro para várias aplicações estruturais, utilizados tanto na indústria automobilística quanto na fabricação de utensílios domésticos, em artigos esportivos, etc.

De desenvolvimento mais recente, surgiram os compósitos de matriz metálica reforçada com fibras, com partículas cerâmicas ou com intermetálicos, satisfazendo as necessidades da indústria aeronáutica e automobilística, no requisito redução de peso associado à estabilidade dimensional e resistência à abrasão a elevadas temperaturas de trabalho.

Assim sendo, a grande maioria dos compósitos de matriz metálica conhecidos apresentam uma constituição de ligas leves, em geral de elevada ductilidade, como material base ou matriz. Essas ligas associadas a materiais cerâmicos, apresentam alto limite de resistência, baixa ductilidade, excelente estabilidade térmica e ainda elevada resistência à abrasão.

Os compósitos apresentam atualmente um crescimento acelerado quanto à sua utilização em engenharia, principalmente na fabricação de componentes, podendo prognosticar-se incrementos futuros ainda mais significativos quanto a sua utilização comercial, dado que em determinados aspectos os compósitos apresentam qualidades particulares e/ou superiores em relação aos materiais monolíticos em uso corrente.

Umas das razões que tornam os compósitos atrativos reside no fato deste oferecer possibilidades de combinações de propriedades não encontradas em materiais convencionais, das quais podem citar-se, como por exemplo, aumento de limite de resistência sem comprometimento do peso, aumento de temperaturas de trabalho associado à redução de expansão térmica, aumento de

resistência à abrasão mesmo em condições de elevadas temperaturas, valores superiores de módulo elástico e resistência à fadiga.

Os compósitos de matriz metálica (CMM), especificamente os de Al e ligas (Cu, Si, Mg como principais elementos de ligas), hoje representam a grande maioria do mercado de compósitos de matriz metálica, segundo MARSDEN (1985). Busca-se na sua produção principalmente a combinação de propriedades de elevada resistência à corrosão, reduzido peso e alta ductilidade, características destas ligas, com as propriedades da cerâmica: alta rigidez, elevada resistência ao desgaste e ainda reduzido coeficiente de dilatação térmica.

Uma aplicação dos compósitos de matriz metálica mais conhecida é o uso desde o início dos anos 80, de ligas de Al reforçadas utilizadas na fabricação de pistões para motores diesel da *Toyota Motor Co.* (DONOMOTO, 1983)

Em 1989, inicia-se nos EUA a produção de cilindros reforçados com compósitos Al/Al₂O₃ e SiC na região da coroa e câmara de combustão para motores de tratores diesel, pela *Cia. Bhon Engine & Foundry*. Mais tarde, em 1991, a empresa *Schmidt Unisia*, na Alemanha, inicia a produção de cilindros reforçados, segundo VACCARI (1991).

Outras combinações de compósitos são citados por CHAWLA (1987), tais como compósitos de matriz metálica a base de Al reforçado com fibras de C, para serem usados na coluna de sustentação de antenas de telescópios espaciais. As fibras de C garantem a estabilidade dimensional com aquecimento pelo sol e rigidez necessárias enquanto o Al garante o reduzido peso. Ligas de Al e Mg reforçadas com fibras de Al₂O₃ são utilizadas em componentes extrudados de automóveis, como por exemplo eixos de transmissão. O mesmo autor cita ainda o uso de ligas de Cu reforçadas com fibras de W para a fabricação de contatos elétricos e para o revestimento de câmaras criogênicas para foguetes espaciais.

2.2. Principais Propriedades dos Compósitos

No desenvolvimento de um compósito, é fundamental o conhecimento prévio e profundo das propriedades físicas/mecânicas e químicas dos componentes individuais, de modo que a combinação no produto final apresente as características requeridas.

Uma propriedade física dos materiais que afeta diretamente a estruturação dos compósitos é o coeficiente de expansão térmica. Uma discrepância muito acentuada nos valores dessa propriedade entre os componentes do compósito dificulta o fenômeno de adesão dos componentes, pois a dilatação ou a contração diferencial favorece a separação das fases na região interfacial. Regiões de interface defeituosas implicam em descontinuidade na transferência de esforço e portanto, no comprometimento das propriedades mecânicas do material.

Um bom desempenho mecânico é um dos principais requisitos para a utilização de materiais compósitos. Excelentes propriedades de tração são obtidas pela incorporação de fibras de B ao Pb segundo BROUTMAN (1974). Também a adição de 45% vol de SiC na forma de fibras à liga Ti-6%Al-4%V acarreta um aumento de 340% no seu limite de resistência, segundo DUDEK (1990).

A necessidade de estabilidade mecânica, especialmente a elevadas temperaturas, para determinados usos, como pás de turbina para alta rotação, tem levado ao desenvolvimento de compósitos constituídos de fases intermetálicas. Geralmente estas fases intermetálicas apresentam elevado ponto de fusão e estabilidade térmica, mas são extremamente frágeis à temperatura ambiente, embora sua resistência mecânica aumente a medida que aumenta sua temperatura, segundo BROUTMAN (1974).

Resultados obtidos por URTIGA (1994), demonstram que no sistema Al-NbAl₃, para ensaios de tração a 150°C, existe um aumento de 85% no limite de resistência, um aumento de até 93% no limite de escoamento e uma redução de até 85% no alongamento com relação ao Al puro. Para ensaios de tração à

temperatura ambiente o autor obteve valores mais baixos comparados aos obtidos à temperatura de 150°C, aumento de somente 50% no limite de resistência, acréscimo de 62% no limite de escoamento e redução de até 90% no alongamento, com relação ao Al sem reforço.

Quanto à resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de matriz Al, vários autores como ROHATGI (1990), OKADA (1984) e KOGUCHI (1983), comprovam o efeito da adição de grafite, na forma de flocos, pós ou fibras de C ao Al e ligas, resultando em excelentes características auto-lubrificantes, podendo o compósito ser utilizado na fabricação de mancais, em substituição às ligas de Cu frequentemente empregadas.

LEONARD (1997), analisam o compósito de matriz metálica comercializado pela Duralcan, contendo 30% vol SiC na liga matriz A357, quanto ao comportamento da resistência ao desgaste para diferentes cargas, que variam entre 6-74 N, concluindo que para cargas na ordem de 6 N o coeficiente de desgaste do compósito é menor que da liga monolítica (A357); para cargas entre 18-40 N o coeficiente de desgaste é similar; mas para cargas maiores de 74 N, o coeficiente do compósito é muito mais elevado que a liga monolítica sem reforço. Resumindo, para cargas de 74 N o compósito apresenta maior desgaste que a liga A357, dado ao fato das partículas de SiC quebrarem e atuarem como abrasivo durante o ensaio.

Por outra parte, ALPAS (1994) analisando algumas ligas de alumínio reforçadas com SiC e Al₂O₃, em ensaios de desgastes, compara a influência do tamanho de partícula adicionada na matriz, e conclui que tamanhos de partículas predominantes de 6 a 12 µm proporcionam uma melhor proteção à matriz das ligas de Al, que partículas de 1 a 2 µm.

Os compósitos de matriz metálica com base Al oferecem hoje em dia resistência ao desgaste superiores às ligas monolíticas, e estão começando a substituir componentes de aço tais como discos de freio (LEONARD 1997).

2.3. Tipos de Compósitos

Os vários tipos de materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a natureza química e geometria dos constituintes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica; componentes reforçantes na forma de fibras, longas ou curtas, de laminados, de partículas, podem ser incorporados à matrizes monolíticas ou pós, proporcionando diferentes estruturas ao compósito.

Os materiais de uso em engenharia, segundo CHAWLA (1987), têm sido convencionalmente classificados de acordo com a sua natureza química e física em:

- a) cerâmicos
- b) metálicos
- c) poliméricos

Os **materiais cerâmicos** têm como características principais a elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade.

Os **materiais metálicos** apresentam como características gerais a excelente ductilidade e excelentes condutividades térmica e elétrica. Os átomos estão unidos em sua estrutura através de ligações metálicas, caracterizadas pela existência de elétrons livres. A combinação de diferentes elementos metálicos e não-metálicos favorece a fabricação de ligas metálicas dentro de uma ampla faixa de propriedades desejadas. Metais como W, Cr e ligas de Al e Ti são os principais exemplos de aplicações em compósitos. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade, o que restringe seu uso em grandes estruturas.

Os **materiais poliméricos** destacam-se pela sua baixa densidade e fácil conformação, além da elevada resistividade elétrica. Apresentam, no entanto, limitação quanto à temperatura de trabalho.

Os materiais compósitos geralmente têm sua composição constituída pela combinação dos materiais: cerâmicos e poliméricos; cerâmicos e metálicos; e, em menor grau, poliméricos e metálicos e ainda cerâmicos, metálicos e poliméricos.

As possíveis combinações na estrutura dos compósitos dependem das suas propriedades desejadas. A conjugação de materiais cerâmicos como reforço e metálicos como matriz tem sido muito utilizada onde a maleabilidade da matriz metálica pode ser combinada com a dureza de pós-cerâmicos.

Matrizes metálicas podem ser reforçadas com diferentes materiais cerâmicos, como carboneto de silício (SiC), C, Al_2O_3 , etc., em diferentes formas, fornecendo as mais distintas propriedades. Por exemplo a adição de *Whiskers* (fibras curtas) de SiC à matriz metálica pode dobrar o módulo de elasticidade e a resistência mecânica comparado com os materiais monolíticos, pela combinação da tenacidade do metal e da elevada dureza e rigidez do SiC.

O componente de reforço no compósito pode apresentar-se na forma particulada, laminada ou de fibras. Os reforços particulados apresentam uma razão de geometria, ou seja, a razão L/D , onde (L) é a dimensão comprimento e (D) é a espessura, próxima ou inferior à unidade. Os reforços fibrosos têm uma razão de geometria muito característica, ou seja, L/D é muito superior à unidade, geralmente acima de 100. As fibras podem ser contínuas quando $L/D \rightarrow \infty$ ou curtas para $L/D < 100$. Os reforços particulados proporcionam compósitos isotrópicos enquanto que os reforços fibrosos e laminados favorecem a compósitos anisotrópicos. A utilização de um ou outro tipo depende das propriedades específicas requeridas para determinada aplicação.

2.4. Métodos de Fabricação de Compósitos de Matriz Metálica (CMM)

Dos processos de fabricação de compósitos de matriz metálica, muitos já foram desenvolvidos, outros porém continuam sua modernização. O processo de fabricação pode ser classificado de acordo com o estado em que se encontra a matriz do compósito a ser obtido, ou seja, o conjunto de processos de fabricação de compósito pode ser agrupado em função do estado (sólido, líquido ou semi-sólido) em que se encontra o metal base.

Utilizando ligas matrizes no estado sólido, técnicas de metalurgia do pó são empregadas para a confecção do compósito (CARON, 1990); quando as matrizes encontram-se no estado líquido desenvolvem-se os CMM por técnicas de infiltração sob pressão de ligas em arranjos pré-compactados de fibras do reforço (ABE, 1985), e no caso das matrizes no estado semi-sólido, utilizam-se técnicas de compofundição (ROHATGI, 1986; FOGAGNOLO, 1996).

Matriz sólida: são utilizadas para ligas de elevado ponto de fusão ou em casos onde o reforço é altamente reativo com a matriz no seu estado líquido, como por exemplo SiC em Ti líquido.

Existem dois subgrupos deste processos, estes são:

- a) Produção de compósitos tipos laminados: matriz e reforço são montados em camadas alternadas de fibras, filamentos ou tecidos e em seguida submetidos à compressão; como por exemplo, KREIDER (1974) reportam a obtenção de compósitos Al/fibras de B envolvendo moderadamente altas temperaturas e pressões, enquanto que SMITH (1984), produzem compósitos Ti/fibras de B utilizando compressão a quente, sob vácuo.
- b) Produção de compósitos particulados: consiste em utilizar técnicas da metalurgia do pó, onde uma mistura dos pós da matriz e do reforço (liga metálica + particulado cerâmico) é compactada, desgaseificada, e

aquecida para a promoção de interações de interface que fornecerão coesão ao material.

As técnicas de metalurgia do pó são bastante utilizadas na produção de compósitos, como por exemplo as ligas de Cr ou Mo reforçados com SiC, para uso em pás de turbinas (BRACKE, 1983) ou as ligas Ti-Al-V contendo partículas de TiC como reforço, para aplicações em trabalho a alta temperatura, (MASOUNAVE, 1990).

Matriz líquida: são aplicáveis à maioria das ligas metálicas de médio ponto de fusão, como as ligas de Al. Existem três subgrupos que resumem a maioria dos processos de fabricação de compósitos a partir de ligas no estado líquido, estes são: infiltração, jateamento e co-jateamento.

a) A infiltração envolve a penetração do metal ou liga líquida num arranjo pré-fabricado do reforço, através das seguintes operações básicas:

- i) preparo de pré-forma
- ii) posicionamento da pré-forma numa coquilha
- iii) infiltração do líquido por compressão ou sucção
- iv) solidificação da matriz

O processo por infiltração é também bastante popular. MORTENSEN (1986) estudou a solidificação da matriz no compósito Al-4,5%wt Cu reforçado com fibras de SiC, analisando o fluxo de líquido nos canais inter-fibras, em função das temperaturas dos constituintes e da fração do reforço, que permitem definir condições operacionais que garantam a boa qualidade do produto.

CARVALHO (1992), analisou a microestrutura do compósito de matriz Al-5,7%wt Cu reforçada com fibras de Al_2O_3 obtido por infiltração, na condição fundida e após tratamentos térmicos. Observou que a presença das fibras interfere significativamente na homogeneização e envelhecimento do material.

- b) O jateamento seguido de trabalho mecânico é um processo que envolve a deposição da matriz líquida, na forma de gotículas, sobre um arranjo de fibras do reforço (tecido, laminados), seguido de trabalho termomecânico para consolidação e densificação. PIGGOTT (1980) e ASANUMA (1984) apresentam compósitos de ligas de Al reforçadas com fibras de C, por deposição de Al por plasma, sobre fibras de C e posterior laminação para coesão e consolidação dos componentes.
- c) O co-jateamento seguido ou não de trabalho termomecânico é um desenvolvimento bastante recente para a produção de compósitos utilizando o processo *Osprey*, já conhecido desde os anos 70, de atomização de metais. Neste processo, segundo descrição de BROOKS (1977), um jato de metal líquido é submetido a um fluxo de gases inertes sob pressão, promovendo a formação de gotículas de metal que são recolhidas num molde, onde solidificam constituindo uma pré-forma metálica. A pré-forma metálica obtida pode ser conformada no produto final desejado por processos mecânicos convencionais.

Para a fabricação de compósitos, o processo *Osprey* é considerado uma combinação de fundição com metalurgia do pó. (CARON, 1990). No processo, o reforço é introduzido no fluxo de gases; gotículas de metal e partículas do reforço formam um jato que ao ser recolhido no molde produz um compósito com boa distribuição dos constituintes. Densificação do produto é obtida por trabalho termomecânico posterior.

Como exemplo desse processo podem ser citados compósitos constituídos de ligas de Al reforçados com SiC (max. 15% vol do reforço) obtidos por co-jateamento utilizando fluxo de N₂, segundo TSAKIROPOULOS (1993).

Matriz semi-sólida: o processo de obtenção de compósitos a partir da matriz no estado semi-sólido reofundido é denominado compofundição, no qual

o reforço é adicionado à matriz no estado pastoso reofundido, sendo esta vigorosamente agitada.

Devido ao comportamento de escoamento não *Newtoniano*, a matriz no estado semi-sólido reofundido apresenta alta fluidez enquanto é agitada, permitindo a incorporação do reforço. A eliminação da agitação provoca um imediato acréscimo na sua viscosidade o que, associado à presença de uma significativa quantidade de sólido na pasta, acarreta o engolfamento e retenção das partículas cerâmicas. Uma razoável qualidade de dispersão do reforço na matriz é assim obtida e inúmeras combinações de ligas de Al e particulados cerâmicos têm sido fabricados por este processo já desde a década de 70, conforme MEHRABIAN (1977).

Para a compofundição são necessários equipamentos específicos para a produção da matriz reofundida. O reforço é adicionado diretamente nestes reatores e o compósito produzido pode ser imediatamente utilizado no processo de conformação desejado, como fundição, forjamento, extrusão.

Muitos são os pesquisadores que estudam o método de compofundição, para produzir compósitos de matriz metálicas reforçados com partículas cerâmicas; como por exemplo: MEHRABIAN (1974); SATO (1981); YAMADA (1989); KOBASHI (1990); MIWA (1990); ICHIKAWA (1991); OZAWA et al. (1994); FOGAGNOLO (1996).

Todos eles analisam parâmetros do processo da obtenção de compósitos via compofundição, por este processo possibilitar a obtenção de compósitos com boas características quanto à distribuição do reforço na matriz.

Um grupo interessante e particular de compósitos são os do tipo *in situ*. Nestes materiais o reforço é uma fase integrante do sistema, como por exemplo uma fase precipitada a partir da matriz (líquida ou sólida) ou formada simultaneamente com ela (eutéticos, por exemplo), propiciando uma perfeita

interação matriz/reforço, com interfaces livres de tensões superficiais e de reações indesejáveis.

Neste tipo de compósito as suas propriedades são somente determinadas pela morfologia, quantidade e distribuição do reforço. Pode-se afirmar que para compósitos *in situ* particulados, reforços com elevada resistência mecânica, de pequenas dimensões, com forma globular e bem distribuídos na matriz, são os mais desejáveis para um produto de qualidades excelentes e isotrópicas, segundo ASKELAND (1987).

São exemplos de compósitos *in situ* os obtidos por controle de precipitação no estado líquido, como o proposto por VERHOEVEN (1980), baseado na liga Cu-Nb. O autor obtém lingotes pela fusão conjunta dos dois elementos, em forno de eletrodo consumível, onde o eletrodo é um arame de Nb revestido com Cu; são obtidos, para várias composições da liga, uma matriz de Cu com dispersão uniforme de dendritas de Nb. Os lingotes são deformados a quente para alinhamento da estrutura, resultando numa matriz de Cu reforçada por fibras curtas de Nb.

Outro exemplo de compósitos *in situ* é apresentado por TERAÔ (1985), ao pesquisar as condições de solidificação e as propriedades mecânicas do compósito *in situ* baseado no eutético Al-Al₃Ni (liga Al-5,7%Ni), obtido por fusão conjunta dos elementos em forno de indução, e subsequente deformação por extrusão isostática, para alinhamento da estrutura.

2.5. Produção de Compósitos Particulados via Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é uma técnica metalúrgica que consiste em transformar pós de metais, metalóides ou ligas metálicas e, às vezes também substâncias não metálicas, em peças resistentes, sem recorrer-se à fusão mas apenas pelo emprego de pressão e calor.

O processo envolve de maneira geral, as seguintes etapas fundamentais:

- a) mistura de pós (metálicos, ligas metálicas ou substâncias não metálicas)
- b) desgaseificação para eliminação de gases,
- c) compactação por compressão da mistura, para aumento da densidade,
- d) sinterização-aquecimento do compactado resultante, de modo a se produzir uma ligação entre as partículas e se conferir resistência mecânica ao compactado.

A consolidação da metalurgia do pó como técnica metalúrgica de uso industrial no Brasil deu-se a partir da Segunda Guerra Mundial, de acordo com DAMM (1987). A partir desta época a técnica estendeu-se a todos os campos da engenharia, estando distribuída por vários setores industriais, visto que o processo da metalurgia do pó é indispensável em alguns casos e em outros apresentam nítidas vantagens, sobretudo de ordem econômica, em relação a outros processos de fabricação.

Alguns exemplos de produtos obtidos por metalurgia do pó podem ser citados:

- a) peças de metais refratários,
- b) metal duro ou carbonetos de metais, para ferramentas de cortes,
- c) mancais porosos autolubrificantes,
- d) discos de fricção metálicos,
- e) certos tipos de contatos elétricos,
- f) escovas coletoras de corrente de diversas composições.

O aumento de produção dos componentes de Al e suas ligas via metalurgia do pó ocorreu a partir das últimas décadas, com a produção de pós de Al de qualidade e o desenvolvimento de técnicas avançadas de processamento. Através da obtenção de propriedades mecânicas compatíveis com uma série de aplicações industriais, as ligas de Al produzidas via metalurgia do pó tornaram-se competitivas com as ligas ferrosas, ligas de Cu sinterizadas e ligas

de Al fundidas, devido a suas características de baixo peso, alta resistência à corrosão e elevada resistividade térmica e elétrica, segundo JAMES (1994).

No caso de produção de compósitos de matriz metálica utilizando a técnica da metalurgia do pó, devem-se levar em consideração os tamanhos de partículas dos pós utilizados, pois uma maior ou menor quantidade de óxido sobre as partículas sinterizadas no processo influenciarão de forma negativa na sinterização rápida do compósito, para o caso do Al. (GERMAN, 1984)

Este mesmo autor resume que as técnicas de metalurgia do pó com sinterização tradicional não apresentam resultados satisfatórios do ponto de vista de propriedades mecânicas, devido à camada de óxido que recobrem as partículas de pó de Al formando uma rede semi-contínua nos contornos, que podem fragilizar o material, formando caminhos para a propagação de fissuras.

COHRT (1990), realizaram experiências de sinterização de pó de liga de Al-4,5%Cu-0,7%Si-0,5%Mg adicionando como reforço 10 e 20% vol de SiC com temperaturas de sinterização de 620 °C e tempos de sinterização entre 30 e 12 min e posterior compactação a quente, não conseguindo atingir 100% da densidade teórica devido às camadas de óxido que recobriam as partículas de pó da liga matriz, mesmo após compactação.

O processo de extrusão a quente dos pós, principalmente dos pós de Al, surge como uma solução ao problema da camada de óxido, conseguindo-se dispersar essa camada na forma de pequenas partículas, reforçando o Al com partículas sem a aparição da rede semi-contínua de óxido, prejudicial ao seu desempenho mecânico, fornecendo um compósito de boa qualidade. (HUNT, 1990).

Uma das vantagens de se produzirem compósitos por metalurgia do pó seguido de uma extrusão é a maior homogeneidade na distribuição do reforço e melhor reprodutibilidade do que as obtidas por processamento de metal líquido, evitando assim a formação de precipitados contínuos e aglomerados de reforço que diminuem a ductilidade do compósito. Também com esta técnica

pode-se adicionar uma maior gama de frações volumétricas de reforço à matriz que podem variar entre 5 e 70% vol de reforço, mas não se recomenda acima de 25% vol de reforço porque pode ocorrer uma diminuição acentuada da ductilidade do compósito. (BACON, 1989)

Algumas desvantagens do processo de obtenção de CMM via metalurgia do pó são: limitação de forma da peça, custos elevados da produção dos pós, investimento em prensas e matrizes e por último menor produtividade comparado aos processos com metal líquido. (FREDEI, 1990)

2.6. O Compósito Al-NbC

Na atualidade continuam desenvolvendo-se CMM, com muita demanda nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística, etc. e nos próximos anos a tendência é aumentar esse desenvolvimento para preservar a vida útil dos componentes, elevando os níveis de resistência mecânica através da fabricação de novos CMM.

Inspirados nesta situação, pensou-se em combinar o Al puro (matriz) com o NbC atuando como reforço, com o fim de se obter um novo material compósito que ofereça novas propriedades, as quais posteriormente possam ser usadas em aplicações específicas. Levando em conta que tanto o Al como o NbC apresentam propriedades bem interessantes separadamente, espera-se encontrar boas propriedades no compósito Al-NbC, resultando desta mistura um compósito com potencialidades elevadas, além de contribuir na ampliação da gama de CMM.

As propriedades físicas do Al, que o tornam interessantes para ser testadas num novo compósito são, segundo KING (1987):

- a) Baixa densidade: $2,69 \text{ g/cm}^3$
- b) Ponto de fusão: $660 \text{ }^\circ\text{C}$
- c) Condutividade térmica: $0,52 \text{ cal}$

- d) Condutividade elétrica: 63,8 % IACS (*International Annealed Copper Standard, IACS=100*)
- e) Modulo de *Young*: 64,2 N/mm²
- f) Dureza: 40 HV (após trabalho mecânico)
- g) Coeficiente de expansão térmica: $31,1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

As propriedades do NbC são, segundo dados dos fabricantes:

- a) Densidade: 7,6 g/cm³
- b) Coeficiente de expansão térmica: $\approx 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- c) Ponto de fusão: 3500 °C
- d) Dureza elevada aproximadamente: 1500 HV

Além das propriedades interessantes dos componentes, foi levado em conta também as disponibilidades de Al e do NbC no Brasil, que são grandes.

Nas últimas décadas o Brasil incrementou a produção de pós de Al de qualidade, desenvolvendo técnicas avançadas de processamento, levando a um aumento da produção de componentes de Al e suas ligas via metalurgia do pó.

No caso do NbC, este é subproduto da redução do minério para a obtenção de Nb metálico. As perspectivas das reservas de Nb existentes no Brasil são suficientes para abastecer o mercado mundial por alguns séculos, e as reservas existentes no exterior abasteceriam o mercado por pelo menos 50 anos. (GUIMARÃES, 1987)

As três maiores minas em operação situam-se em Araxá e Catalão no Brasil e em *Saint Honoré* no Canadá, que juntas respondem a cerca de 90% da produção mundial de Nb. Nestes depósitos, o pirocloro e o bariopirocloro são os minerais portadores de Nb.

Os dados relativos a estas reservas podem ser vistos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Reservas mundiais de pirocloro. (GUIMARÃES, 1987)

PAÍS	RESERVAS (em toneladas de metal)	PARTICIPAÇÃO MUNDIAL (%)
BRASIL	10.524.000	93,5%
CANADÁ	318.000	2,8%
ZAIRE	416.000	3,7%
Total	11.258.000	100%

Os processos envolvidos na extração do Nb como produto elementar até sua consolidação como metal puro a partir do minério, são mostrados na figura 2.1, onde pode ser observado que NbC em pó é produto obtido naturalmente no processo, envolvendo a redução do Nb_2O_5 com C.

Assim, é perfeitamente viável a disponibilidade de NbC no mercado nacional.

Após a pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho não foram encontrados trabalhos científicos reportando a utilização do NbC como reforço de matrizes de Al, na produção de compósitos via metalurgia do pó. Há informação, no entanto, sobre o compósito TiAl-NbC, produzidos por arcos de plasma. HIROSE (1996) analisou comparativamente compósitos de matriz TiAl reforçados com NbC e TiB_2 , quanto a propriedades mecânicas.

O autor analisa diferentes porcentagens volumétricas de reforço para cada combinação dos compósitos TiAl-NbC e TiAl- TiB_2 , concluindo que no compósito reforçado com NbC, a dureza e os resultados de testes de tensão/compressão apresentaram incrementos progressivos à medida que se aumenta o volume de reforço, enquanto que no compósito reforçado com TiB_2 manifestou-se um pico de valores de propriedades para 5% de reforço sendo

que para porcentagens superiores a 5%, os valores de dureza e o limite de escoamento sofreram uma queda.

Diante da inexistente informação sobre compósitos Al-NbC e da possibilidade de boas propriedades físicas e mecânicas sugeridas pelos componentes individuais, este trabalho se justifica.

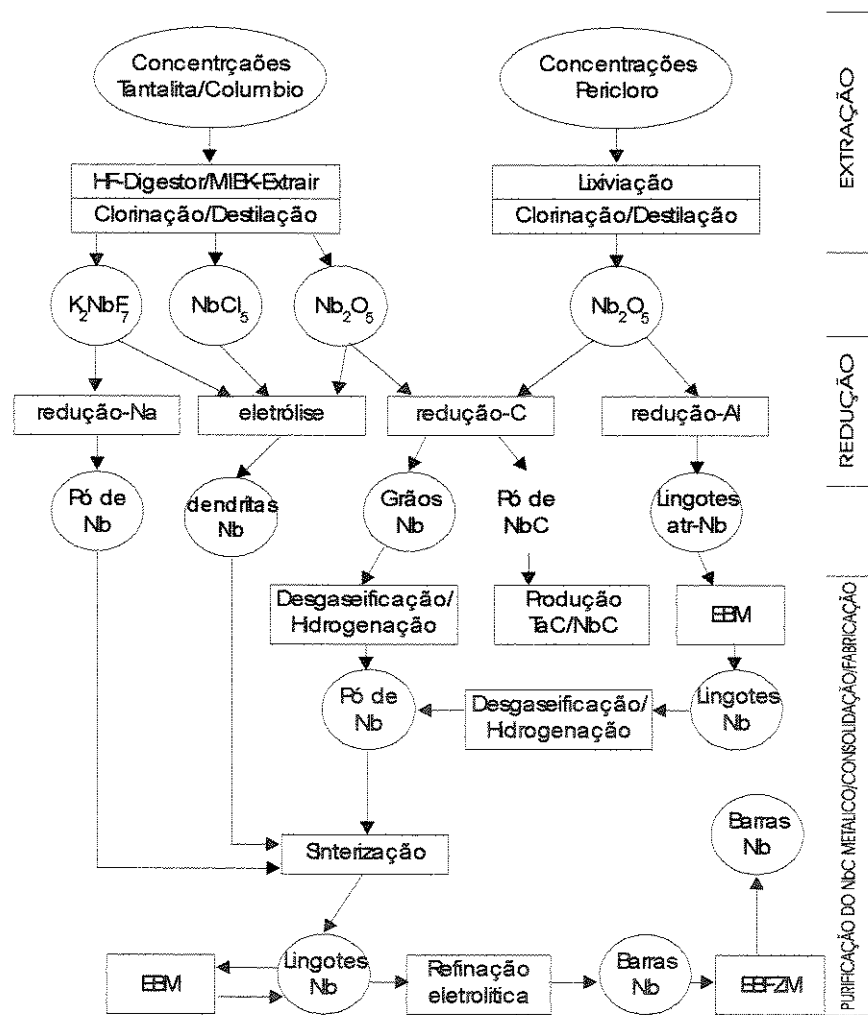


Figura 2.1. Etapas para produção e processo de purificação do Nb metálico: Extração, Redução e Purificação/ Consolidação/ Fabricação do Nb.

CAPÍTULO 3

Procedimento Experimental

Este capítulo trata dos procedimentos experimentais envolvidos na caracterização mecânico-metalúrgica de compósitos Al-NbC contendo três diferentes frações volumétricas do reforço: 5, 10 e 15%.

Em primeiro lugar são apresentadas as matérias-primas utilizadas, seguido da descrição do processo de produção dos compósitos, do planejamento experimental para caracterização metalúrgica e de propriedades mecânicas dos materiais fabricados, e por último são apresentadas as técnicas utilizadas para tais caracterizações.

3.1. Matérias-Primas Utilizadas

Os compósitos estudados foram obtidos a partir de dois tipos de matérias-primas, ambos pós:

- a) O Alumínio (Al), pó de tipo metálico.
- b) O Carboneto de Nióbio (NbC), pó de tipo cerâmico.

3.1.1. Alumínio

O pó de Al, gentilmente doado pela ALCOA (MG), de pureza comercial, tipo AA1100, foi produzido por atomização a ar e manipulado sob atmosfera de gás inerte, segundo dados do fornecedor. Sua composição química nominal, fornecida pelo fabricante, está mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1-Composição química do pó de Alumínio AA 1100, segundo análise feita pela ALCOA (Poços de Calda).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%peso)		Especificações ALCOA	
		Limites (%)	
		Mínimo	Máximo
Al	99,700 - 99,830	99,7	-
Si	0,037 - 0,120	-	0,15
Fe	0,089 - 0,180	-	0,25
Outros	0,001 - 0,069	-	0,15

O pó de alumínio produzido por este método tem uma aparência de cor cinza-branco, apresentando alta reflexividade e as seguintes propriedades, segundo KING (1987):

- Densidade $\Rightarrow 2,699 \text{ g/cm}^3$
- Ponto de fusão $\Rightarrow 660,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Estrutura cristalina $\Rightarrow$ Cúbica de Face Centrada (CFC)
- Coeficiente de expansão térmica $\Rightarrow 31,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Parâmetro de rede $\Rightarrow 0,40414 \text{ nm}$

Através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foram registradas fotografias com o objetivo de se visualizar a morfologia das

partículas do pó de Al e o seu tamanho de forma geral, os quais podem ser observados na figura 3.1.

Pode-se observar a diversidade de tamanhos e geometrias das partículas, com predomínio de formas arredondadas, com superfícies lisas e sem poros.

Pelas fotos pode-se estimar tamanhos de partículas variando entre 7 a 25 μm .

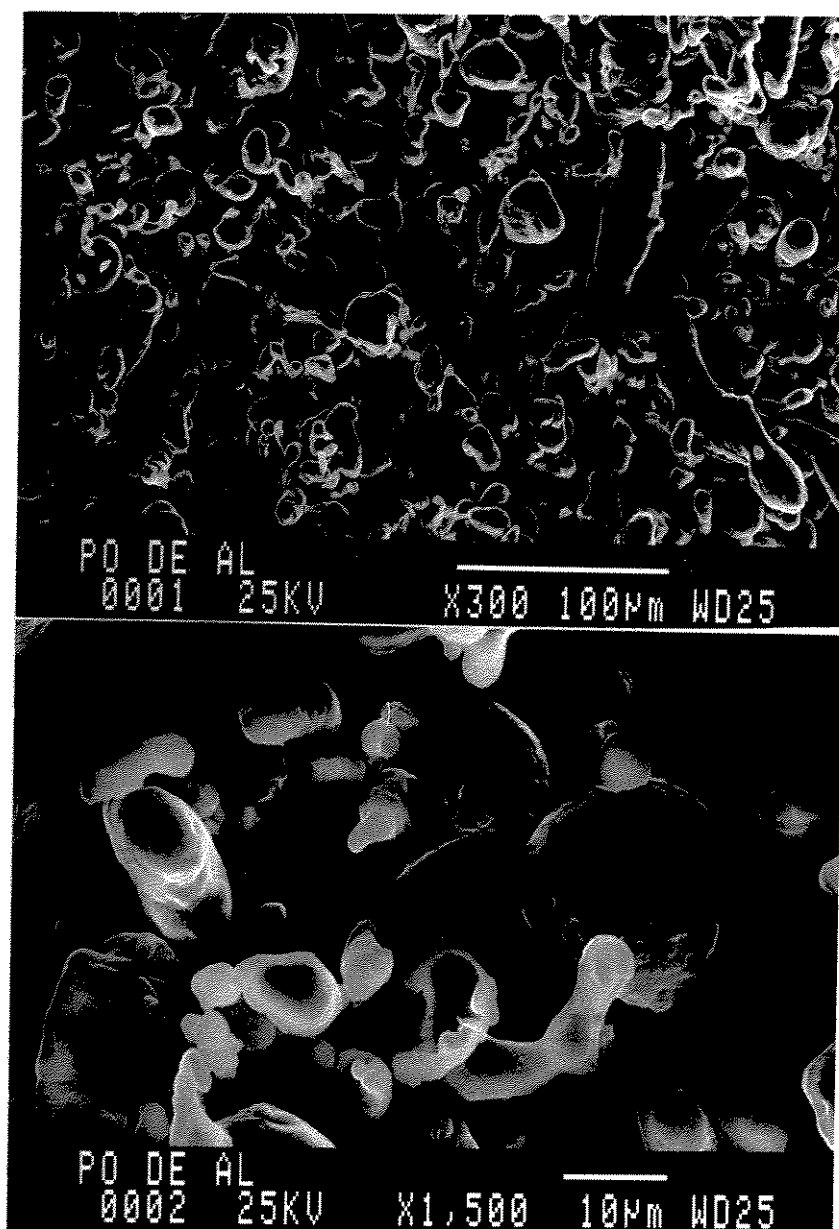


Figura 3.1-Morfologia do pó de Alumínio AA 1100, utilizado no trabalho.

Com o intuito de melhor caracterizar as dimensões das partículas do pó Al, foi feito ensaio granulométrico, sendo os resultados apresentados a seguir. (Ensaio efetuado no IPEN-SP).

A figura 3.2 apresenta o resultado da distribuição granulométrica obtida e a tabela 3.2, os valores de diâmetros máximo, mínimo, médio e desvio padrão medidos.

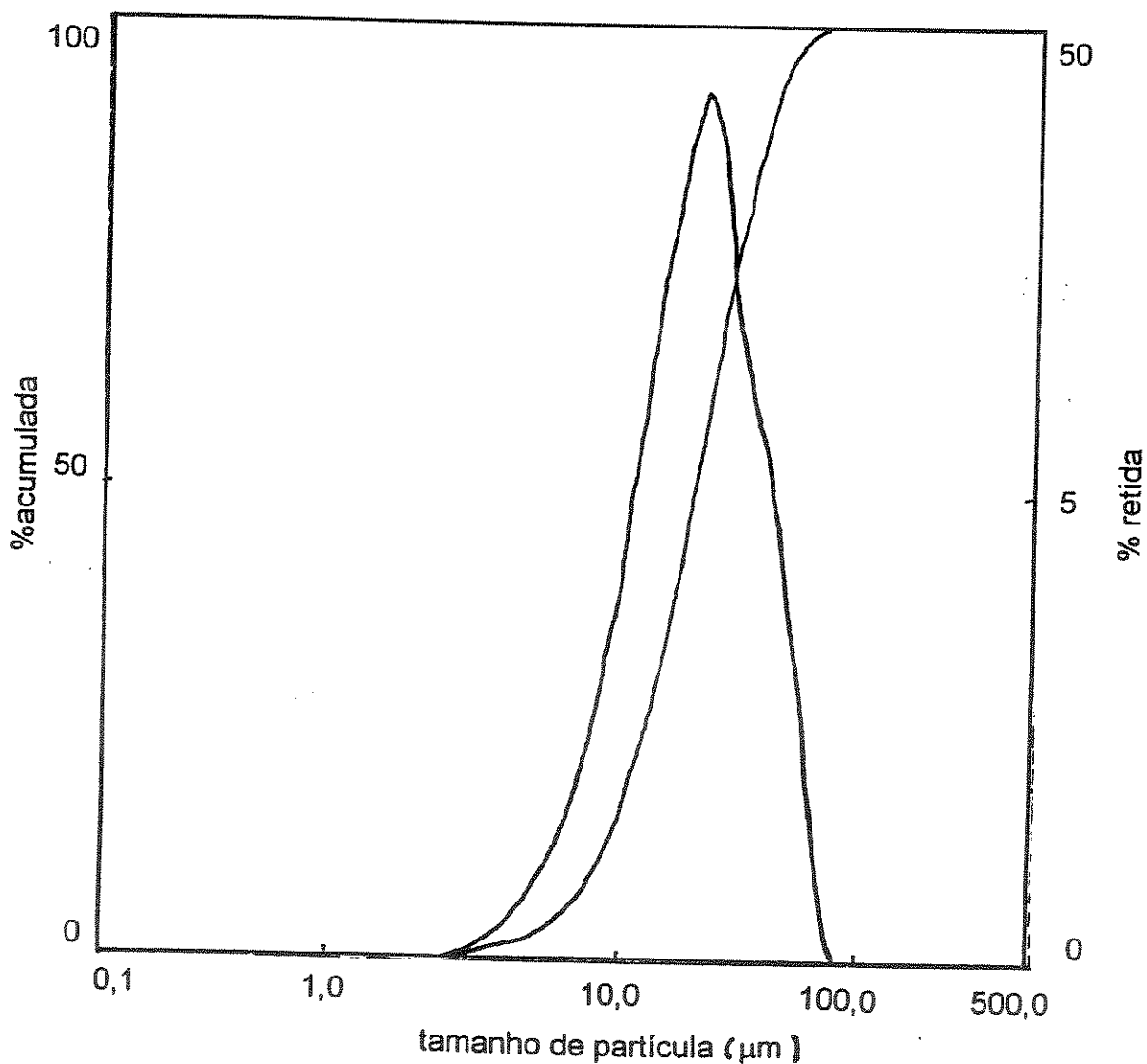


Figura 3.2-Gráfico da distribuição em porcentagem, do tamanho de partículas do pó de Alumínio AA 1100.

Tabela 3.2-Resultados da caracterização granulométrica do pó de alumínio AA1100.

Diâmetro médio de partículas	24,73 μm
Diâmetro mínimo	9,53 μm
Diâmetro máximo	44,33 μm
Desvio padrão	13,29 μm

3.1.2. Carboneto de Nióbio

O pó de carboneto de Nióbio (NbC) foi gentilmente cedido pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração). Este pó de NbC, de cor marrom, em geral apresenta as seguintes características, segundo dados de fabricantes:

- Densidade $\Rightarrow 7,6 \text{ g/cm}^3$
- Ponto de fusão $\Rightarrow 3500 \text{ }^\circ\text{C}$
- Estrutura cristalina $\Rightarrow$ Cúbica de fase centrada (CFC)
- Coeficiente de expansão térmica $\Rightarrow \approx 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Parâmetro de rede $\Rightarrow 0,444 \text{ nm}$

A composição química do NbC adquirido foi determinada pelo método de difração de raios X (realizada no IPEN-SP). A figura 3.3 apresenta os resultados obtidos.

A análise dos picos observados revela a presença significativa somente de NbC (todos os picos mensuráveis correspondem a este composto), como mostrado na tabela 3.3.

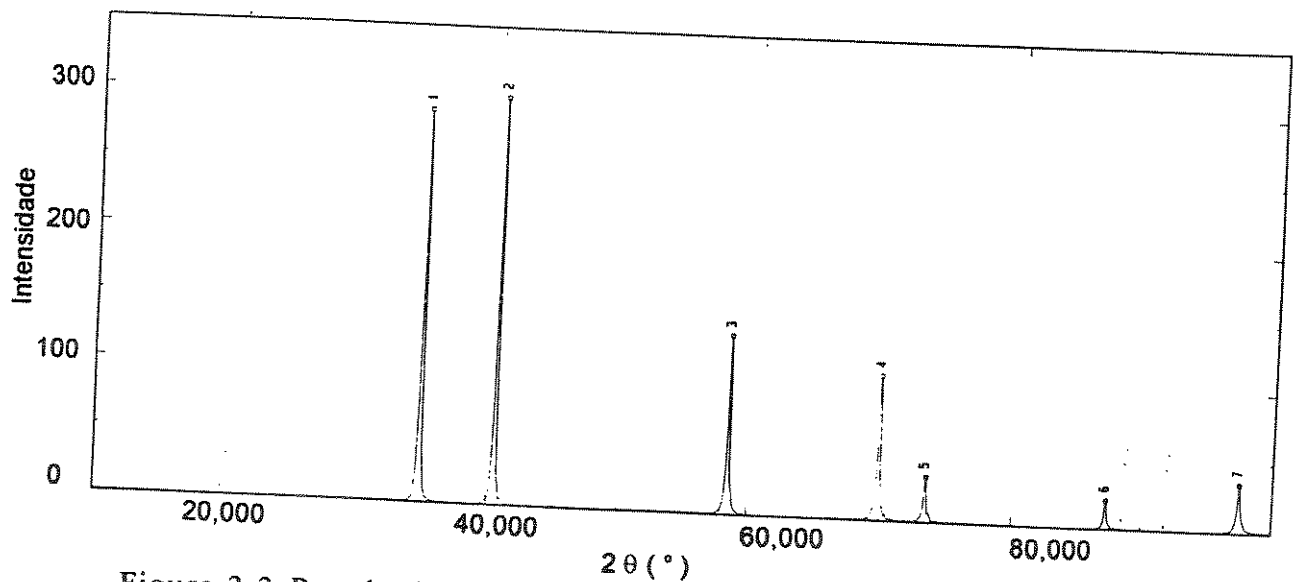


Figura 3.3-Resultados da análise química do NbC, realizado pelo método de difração de raios X.

Tabela 3.3-Indexação dos picos de difração de raios X do NbC com estrutura CFC e parâmetro de rede $a_0=0,444$ nm.

Picos	Índice de Miller (hkl)	Distância Interplanar (d) nm
1	111	0,257
2	200	0,223
3	220	0,157
4	311	0,134
5	222	0,128
6	400	0,111
7	420	0,099

Na figura 3.4 mostra-se o aspecto morfológico deste pó em fotografia feita em MEV, pode-se observar que o NbC é um pó superfino, com morfologia das partículas arredondadas de superfície porosa. Pode-se estimar tamanhos de partículas variando de 1,5 a 6 μm .

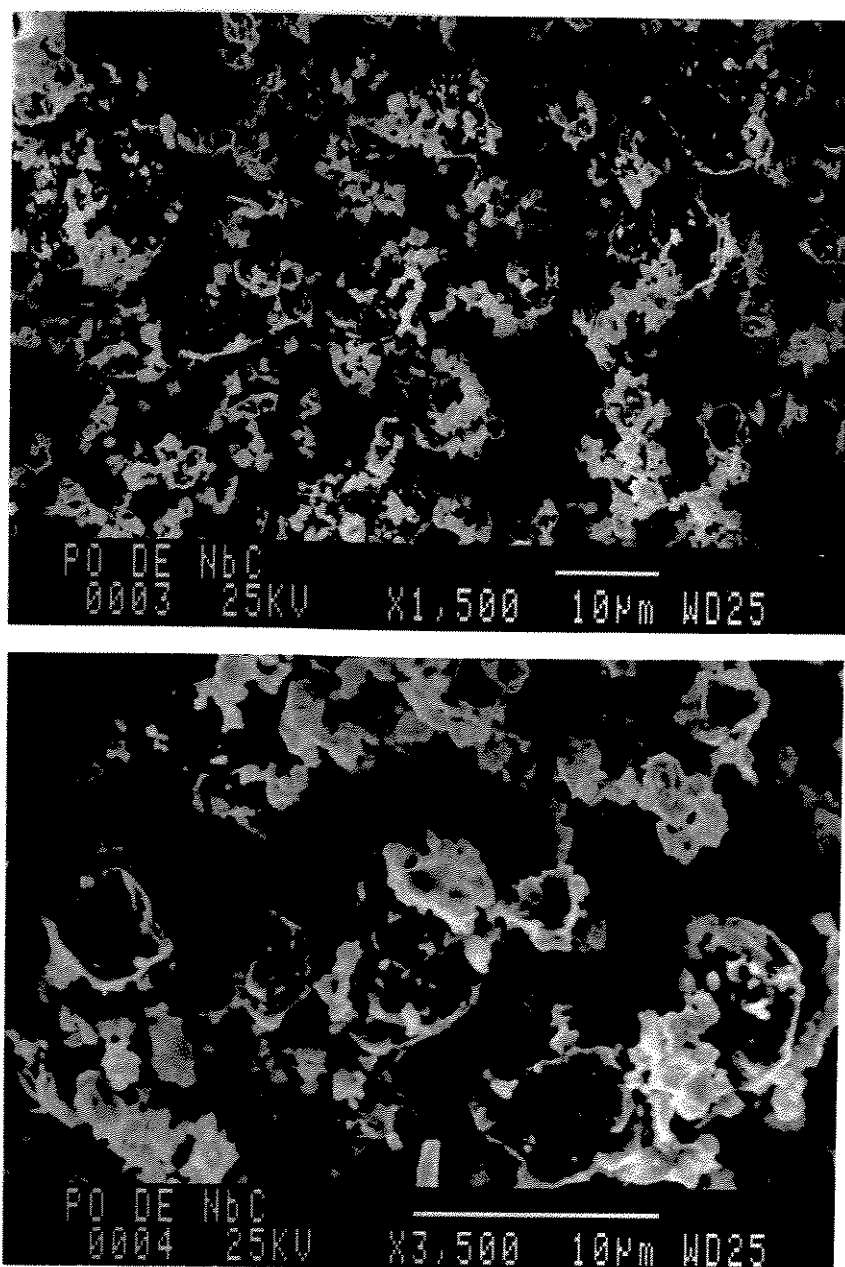


Figura 3.4-Fotografias em MEV do pó de Carboneto de Níbio (NbC), utilizado no trabalho.

Também neste caso, uma melhor caracterização do pó foi feita através de análise granulométrica, com o objetivo de determinar o tamanho e distribuição de partículas. A figura 3.5 e a tabela 3.4 apresentam os resultados obtidos.

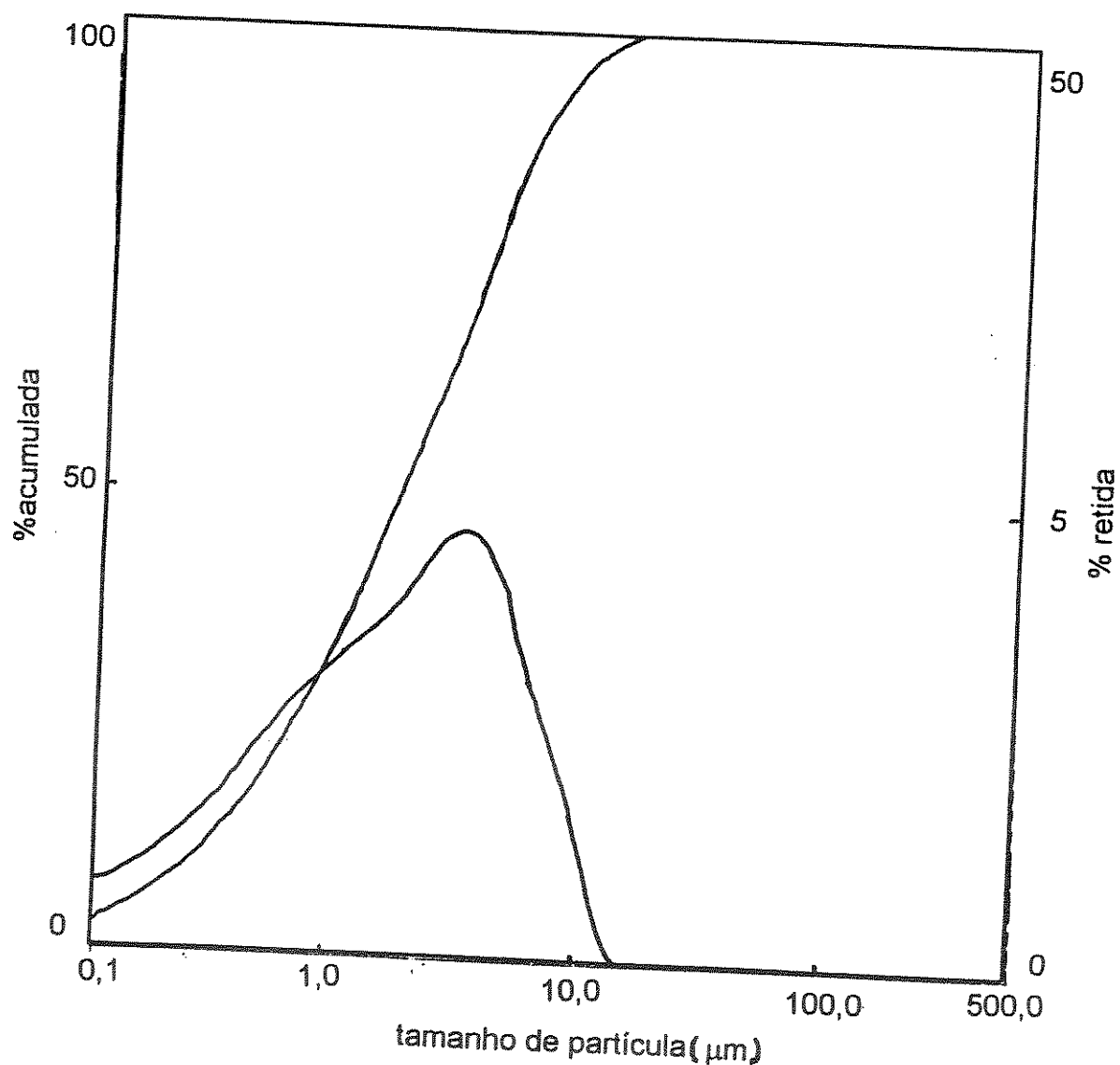


Figura 3.5- Gráfico da distribuição em porcentagem, do tamanho de partículas do pó NbC.

Tabela 3.4. Resultados da caracterização granulométrica do pó de NbC.

Diâmetro médio de partículas	1,60 μm
Diâmetro mínimo	0,24 μm
Diâmetro máximo	5,36 μm
Desvio padrão	2,15 μm

3.2. Produção dos Compósitos Al-NbC

A partir dos pós Al e NbC descritos anteriormente foram produzidos compósitos, com três valores diferentes de porcentagens volumétricas do reforço: 5, 10 e 15% vol de NbC, via metalurgia do pó. O produto foi extrudado e analisado nesta condição. Todo o processamento dos compósitos foi feito no IPEN-SP, sob supervisão do Dr. Jesualdo Luiz Rossi.

A figura 3.6 representa um diagrama de blocos que ilustra de forma clara e resumida as diferentes etapas transcorridas para a produção dos compósitos, as quais são semelhantes às utilizadas por MOURISCO (1995), para a produção de compósitos Al-SiC.

O procedimento experimental adotado para a produção dos compósitos constou inicialmente, como se observa na figura 3.6, de uma secagem dos pós em estufa a 100 °C, por quatro horas. Em seguida os pós foram misturados e homogeneizados em misturador tipo “Y” com capacidade útil de 7 litros, girando a 40 rpm por 4 h. As frações volumétricas de NbC foram calculadas segundo a relação:

$$\%V_{NbC} = \frac{0,355 \cdot m_{NbC}}{0,355 \cdot m_{NbC} + m_{Al}}$$

$\%V_{NbC} \Rightarrow$ fração volumétrica do pó NbC
 $m_{NbC} \Rightarrow$ massa de pó de NbC
 $m_{Al} \Rightarrow$ massa do pó de Al
 $0,355 \Rightarrow \rho_{Al}/\rho_{NbC}$

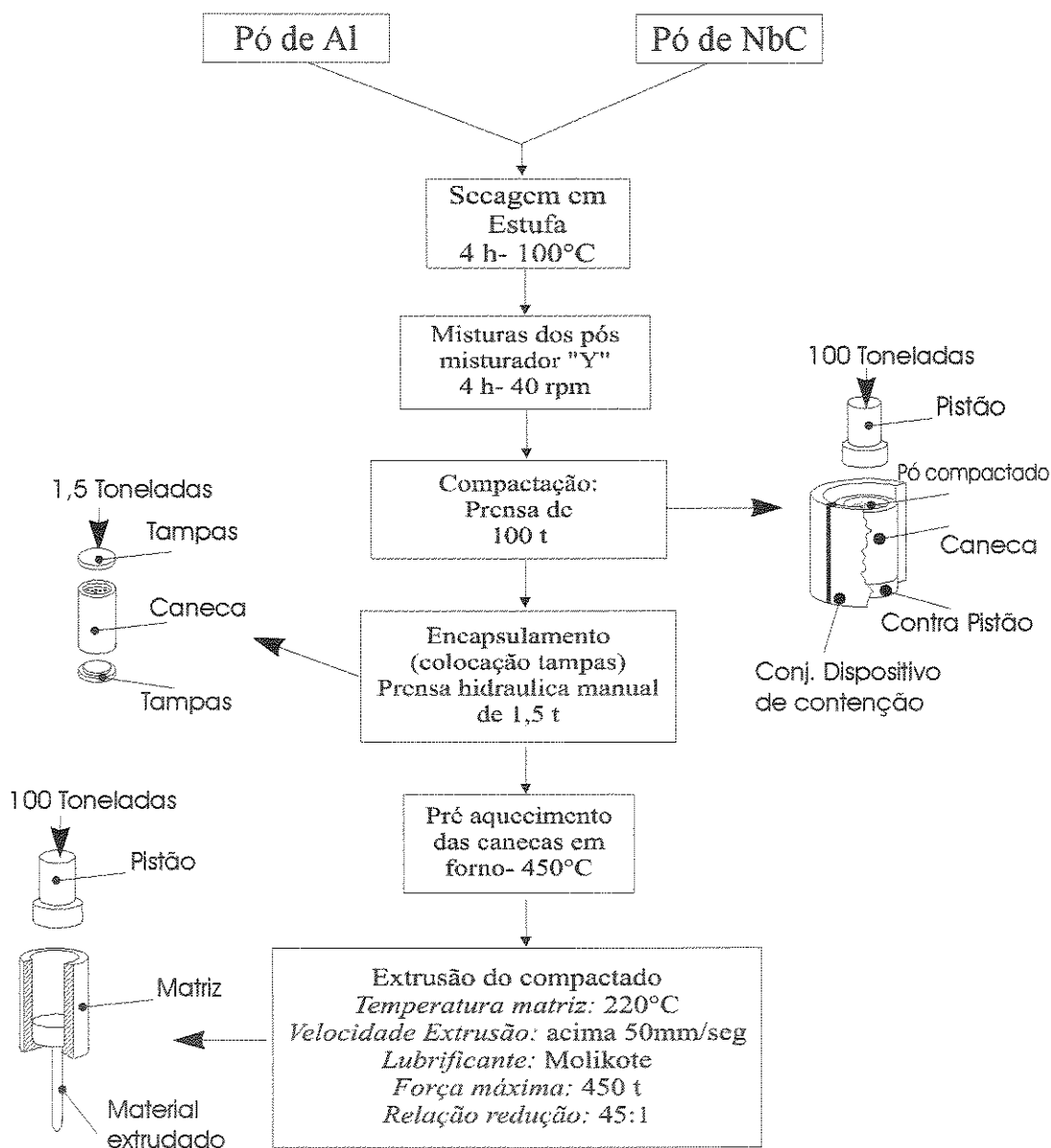


Figura 3.6-Processo de obtenção dos compósitos Al-NbC, via metalurgia do pó e extrusão.

As misturas foram então compactadas em canecas de alumínio AA6063 de dimensões interiores: diâmetro 107 mm e altura 120 mm, com 10 mm de espessura de parede; usando-se pressões de 61 MPa. Tais canecas contendo as misturas foram então aquecidas a 450 °C por 4 h e extrudadas utilizando-se a relação de redução de 45:1.

As extrusões foram feitas utilizando-se uma prensa vertical de 1500 t., pertencente ao laboratório de transformação mecânica do IPT/USP/São Paulo. O tempo de cada extrusão foi de aproximadamente 10 segundos para cada carga, e a carga máxima de 450 t.

Foram assim obtidas barras cilíndricas de diâmetro 20 mm e de comprimento 6 m aproximadamente, utilizadas neste trabalho para caracterização mecânico-metalúrgica.

Foi também produzida, seguindo o mesmo procedimento, barra de Al sem adição do reforço NbC, para utilização como referência para avaliação da influência do reforço nas propriedades mecânicas do material.

3.3. Planejamento Experimental

Antes de dar início à descrição de como foram realizadas as caracterizações e os ensaios envolvidos, comentar-se-á a necessidade de uma análise estatística preliminar, com o objetivo de determinar o número de corpos de provas significativamente representativos para cada ensaio de modo que os resultados obtidos estejam dentro de limites de confiabilidade preestabelecidos. A figura 3.7 apresenta um diagrama que resume as etapas seguidas para a análise estatística.

Antes de dar procedimento ao planejamento experimental foi necessário saber exatamente o que se deseja estudar, como obter os dados e uma estimativa da quantidades de corpos de provas a serem analisados.

Observa-se no fluxograma que a etapa inicial corresponde ao reconhecimento e definição do problema, o qual depende em grande parte da experiência já adquirida no estudo de processos semelhantes.

Em uma etapa posterior, vem a escolha das variáveis de influência (VI) e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas, definindo-se o nível específico (valor) a ser empregado em cada ensaio. Para este trabalho as

variáveis de influência foram a porcentagem de reforço, variando em valores de 0, 5, 10 e 15% vol

Definidas as VI procede-se a escolha da variável de resposta (VR), as quais devem ser mensuráveis, controláveis e objetivas para a análise dos resultados. Conjuntamente a esta escolha, selecionam-se os instrumentos a utilizar com seu erro associado. As VR correspondem aos resultados obtidos através dos ensaios de tração, desgaste, dureza e densidade, separadamente explicados com maior detalhamento em itens posteriores.

Na sequência estabelece-se uma tolerância de confiança do experimento, que depende dos erros associados a cada instrumento utilizado para medir as VR. Assim, a tolerância estabelecida foi de 5%, significando 95% de confiança na afirmação dos resultados das medições.

Define-se então o planejamento estatístico a ser empregado, utilizando-se neste trabalho o do tipo: "Planejamento Experimental Completo Aleatorizado por Blocos", o qual permite realizar um experimento com maior precisão, reduzindo a influência de variáveis incontroláveis, objetivando avaliar a influência dos tratamentos para uma dada variável de influência, bloqueando-se uma fonte de variabilidade, a qual deseja-se eliminar. Para este caso verifica-se a influência das porcentagens do reforço no compósito sobre as diferentes medições dos ensaios de: tração, desgaste, dureza e densidade. Bloqueando assim os tipos de ensaios, cada bloco contém todas as porcentagens de compósitos os quais são aleatorizados dentro de cada bloco.

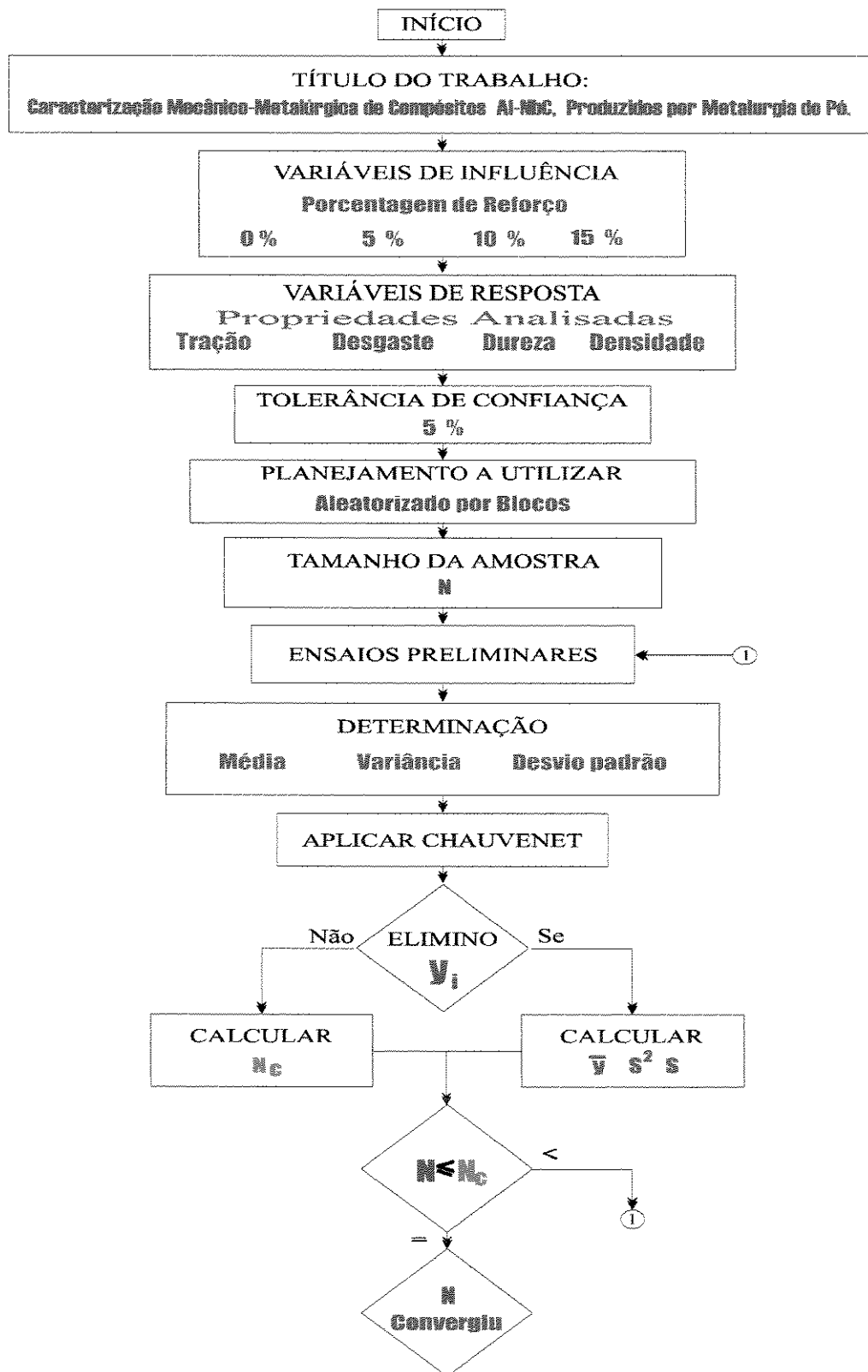


Figura 3.7- Fluxograma das etapas envolvidas no planejamento experimental.

A seguir, escolhe-se um tamanho de amostra (N) para cada ensaio. Este valor, a princípio foi selecionado a partir de bibliografias consultadas onde realizam-se ensaios semelhantes com materiais parecidos, constituindo este N um número que será posteriormente comparado com outro (N_c) devidamente calculado a partir de resultados experimentais.

Ensaia-se então N corpos de provas e determina-se com os resultados dos ensaios: a média das medições, sua variância e desvio padrão. Se existir algum resultado de uma ou mais réplicas que podem ser questionáveis do resto dos valores e se deseja saber se pertence ou não às séries de resultados, aplica-se então o procedimento de *Chauvenet* para rejeitar ou manter esses resultados na análise da amostra. Tal procedimento consiste no cálculo da razão de desvio padrão, DR:

$$DR = \frac{|y_i - \bar{y}|}{S}$$

$y_i \Rightarrow$ componente dos resultados da amostra
 $\bar{y} \Rightarrow$ média resultante dos componentes da amostra
 $S \Rightarrow$ desvio padrão

O componente dos resultados y_i , será rejeitado se:

$$DR > DR_o$$

e mantido se:

$$DR \leq DR_o \quad DR_o \Rightarrow \text{razão padrão (tabela de Chauvenet)}$$

Por último calcula-se N_c para amostras pequenas, menores que 20, indicando-se para isto o uso da distribuição *t* de *Student*, tendo-se a seguinte relação:

$$N_c = \left(t \frac{S}{\delta} \right)^2$$

$t \Rightarrow$ *t* de *Student* (tabela)
 $S \Rightarrow$ Desvio padrão
 $\delta \Rightarrow$ Intervalo de confiança
 $N_c \Rightarrow$ número de réplicas

$$\delta = \alpha \cdot \bar{y}$$

Com o valor de N_c calculado compara-se com o N dado inicialmente devido a experiências. Se é igual, então convergiu, caso contrario recalcula-se o N_c com um novo valor de t , até que resultem valores repetidos. Para o caso de $N \leq N_c$, então repete-se os ensaios preliminares com outro N .

Nos diferentes ensaios utilizados neste trabalho e apresentados em item que seguem, mostra-se os valores de N_c calculados para cada ensaio específico.

3.4. Caracterização Metalúrgica dos Compósitos

A caracterização metalúrgica dos compósitos Al-NbC foi feita através da análise de suas macroestrutura e microestrutura, conforme itens que se seguem.

3.4.1. Caracterização Macroestrutural

Amostras para análise macroestrutural dos compósitos Al-NbC foram retiradas a partir de barras extrudadas; para cada compósito foram extraídos três corpos de provas de diferentes regiões da barra (início, meio e fim). Cada amostra com dimensões de 40 mm de comprimento, foi seccionada longitudinalmente com auxílio de disco diamantado, como mostra a figura 3.8, para preparo da superfície para observação.

Foram então preparadas por lixamento, com lixas de granulometria 220, 320, 400 e 600 sucessivamente, e lavados com água, acetona e finalmente secados com ar quente.

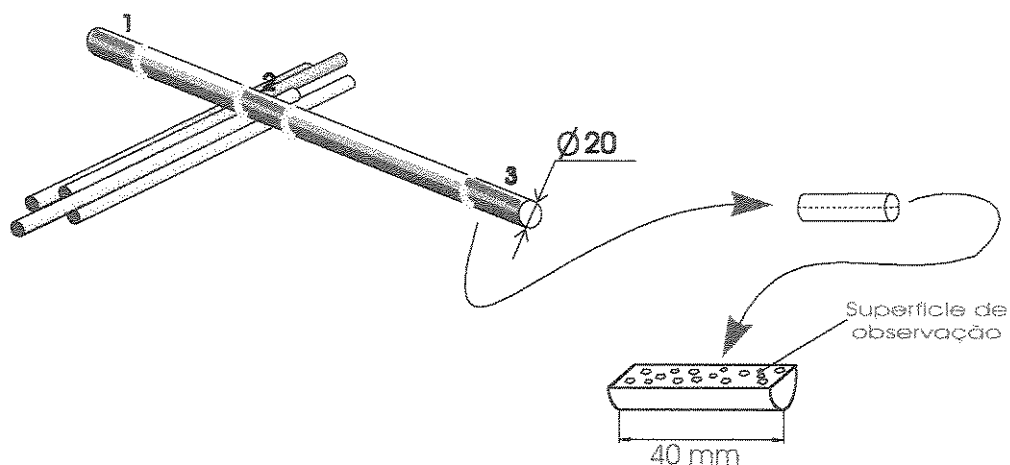


Figura 3.8-Indicação de corte dos corpos de prova para análise macroestrutural dos compósitos Al-NbC.

Foram assim obtidos 9 corpos de prova (3 para cada tipo de compósito) os quais foram atacados com reagente específico para este metal: HF-5% (ácido fluorídrico), tempo de ataque 40 segundos, seguido de lavagem e secagem. As superfícies preparadas foram em seguida fotografadas.

3.4.2. Caracterização Microestrutural

Amostras para a caracterização microestrutural dos compósitos Al-NbC (5, 10 e 15% vol), foram extraídas das barras extrudadas como se ilustra na figura 3.9; para cada compósito analisaram-se três corpos de prova com dimensões de 10x13 mm, retirados das mesmas posições na barra que as amostras para análise de macroestrutura.

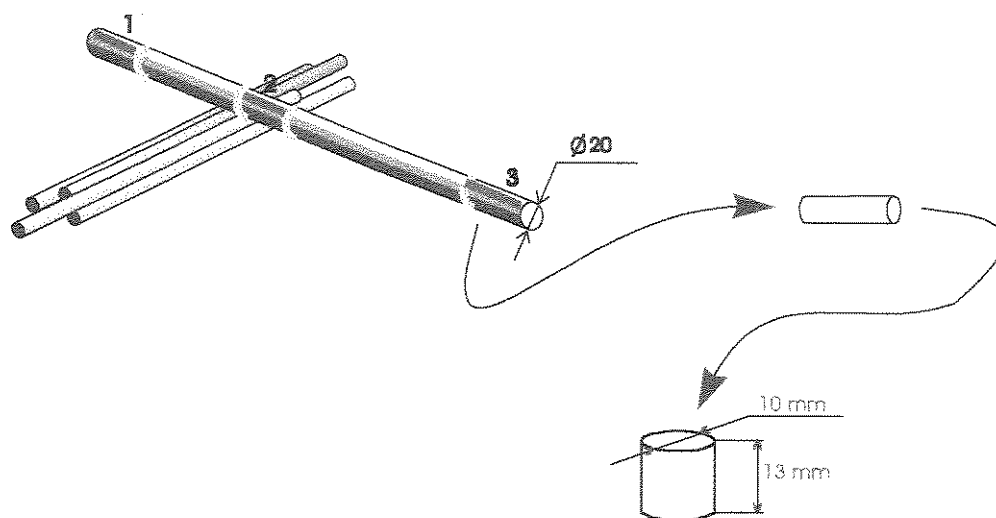


Figura 3.9- Indicação de corte de amostras para análise microestrutural dos compostos Al-NbC.

No procedimento de lixamento utilizaram-se lixas de SiC de granulometria 220, 320, 400, 600 e 1200 sucessivamente. Em seguida os corpos de prova foram polidos em panos de 6 μm , 1 μm e 0,25 μm sucessivamente, com lavagem com ultra-som entre panos.

Lavados os corpos de prova após o polimento, com acetona e secos com ar quente, sua estrutura é revelada por ataque eletroquímico, com solução apresentada na tabela 3.5, indicada para ligas contendo Nb.

Tabela 3.5- Composição química da solução utilizada no ataque eletroquímico dos compostos Al-NbC (5,10,15% vol)

REAGENTE PARA LIGAS CONTENDO Nb	
Acido oxálico	5 g
Acido cítrico	5 g
H ₃ PO ₄	5 ml
Acido Láctico	10 ml
Água destilada	35 ml
Álcool	600 ml

Utilizou-se as condições: tensão de 19 V e tempo de 5 s.

Os corpos de prova foram utilizados para a análise microestrutural, via microscopia ótica e eletrônica, para observação e caracterização de fases presentes, caracterização da distribuição das partículas de reforço e medida de microdureza.

Análise microestrutural geral: utilizou-se para microscopia ótica banco metalográfico modelo Neophot-32, marca Zeiss, utilizando luz polarizada, acoplado a sistema de análise de imagens, com *software* dedicado. Para microscopia eletrônica utilizou-se microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JOEL modelo JXA 840A, cujo sistema de análise utiliza um espectrômetro de energia dispersiva (*Energy Dispersive Spectrometer*). As condições de operação utilizadas foram:

a) corrente de filamento	200 μ A
--------------------------	-------------

b) tensão de aceleração do feixe	20 KeV
----------------------------------	--------

As amostras foram analisadas no MEV em termos de observação geral, microanálises pontuais e observações da interface reforço/matriz.

Para microanálise por feixe de elétrons das fases presentes nos compósitos e suas interfaces, foram utilizadas condições: tensão de 16 KV e corrente variável conforme condições do filamento, realizando-se análise em partículas do reforço de NbC com diferentes morfologias e na matriz de Al.

Distribuição do reforço: a caracterização da distribuição das partículas de NbC nos diferentes compósitos foi efetuada com auxílio de analisador de imagens com *software* dedicado e programa apropriado (anteriormente desenvolvido no Instituto de Física/UNICAMP).

O programa oferece medições do diâmetro de cada partícula de reforço identificada, fazendo uma contagem delas; em seguida ilustra num histograma

as porcentagens dos diâmetros de partículas que distribuem-se na matriz. O programa completo é apresentado no Apêndice I.

Foram efetuadas dez medidas por amostras, sendo 3 amostras por compósito; portanto um total de 30 ensaios para cada compósito. Foram contadas cerca de 10 000 partículas para cada compósito.

Foi contada quantidade de partículas por área analisada, sendo também apresentada a distribuição de porcentagem de partículas para cada intervalo de tamanho de partículas. O número de intervalos foi sessenta, onde seu passo deu-se a cada 0,167 μm de diâmetro, começando sempre desde zero.

Microdureza: os ensaios de microdureza são descritos no item 3.5.3.

3.5. Caracterização Mecânica dos Compósitos

Para caracterização mecânica dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) foram efetuados ensaios de resistência à tração à temperatura ambiente, de desgaste e de dureza. Para caracterização física destes materiais, foram também realizados ensaios de expansão térmica e densidade aparente.

O procedimento experimental adotado nos testes são apresentados a seguir.

3.5.1. Ensaio de Tração

Para ensaios de tração dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) foram confeccionados corpos de provas seguindo a norma ASTM E8-96. A figura 3.10 indica a geometria e dimensões dos corpos de prova segundo esta norma.

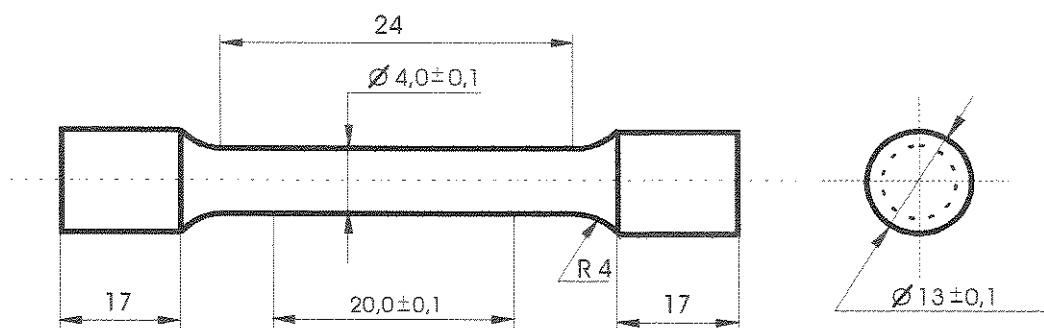


Figura 3.10-Esquema representativo dos corpos de prova para ensaios de tração, segundo norma ASTM E8-96.

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, em máquina de tração hidráulica MTS, com capacidade de carga de 10.000 Kg; utilizando velocidade de aplicação de carga de 0,2 mm/s e fundo de escala de 200 Kg. Esta máquina está ligada a um computador que por sua vez registra e salva os valores de tempo, força aplicada e deslocamento, visualizando em tempo real o gráfico de tensão vs deformação.

A quantidade de corpos de prova ensaiada (N_c) foi pré-estabelecida como quatro para cada tipo de material (Al sem reforço, compósitos contendo 5, 10, 15% vol de NbC), segundo procedimento indicado no item “planejamento experimental”.

Dos gráficos tensão-deformação obtidos, foram extraídas as características mecânicas dos compósitos analisados: limite de resistência (LR), limite de escoamento (LE), alongamento porcentual (A%) e a estrição (Z%), estes dois últimos medidos diretamente no corpo de prova com auxílio de um paquímetro.

3.5.2. Ensaios de Resistência ao Desgaste

O ensaio adotado neste trabalho para analisar o comportamento da resistência ao desgaste dos compósitos Al-NbC, foi do tipo abrasivo.

A escolha do tipo de ensaio deu-se, em primeiro lugar, ao fato de que o ensaio do tipo abrasivo é empregado para comparação de resistência ao desgaste de materiais distintos aqui considerando-se o Al e os compósitos Al-NbC (5,10, 15%vol) como materiais diferentes; em segundo lugar pela confiabilidade no equipamento disponível, já testado em outros trabalhos com bons resultados e ainda por ser ensaio de realização rápida e possibilidade de utilização de lixas de granulometria variável como superfície abrasiva.

Foi utilizada máquina de ensaio abrasivo do tipo “Desgaste Pino sobre Disco”, pertencente ao Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia de Materiais - Escola de Engenharia de São Carlos/USP - São Carlos.

A máquina de ensaio consta de um disco rotativo¹ movido por um motor elétrico, o qual está ligado a um circuito controlador de giros, o que permite fixar 200 giros marcado por um tacômetro². Um êmbolo³ desliza de forma retilínea em movimento de vai e vem sobre o disco que contém a superfície abrasiva (lixa)⁴. Este êmbolo contém na extremidade um cilindro inserido⁵ perpendicular ao êmbolo e à superfície abrasiva, dentro dele desloca-se o porta - amostra⁶ e a carga⁷ que o usuário deseja utilizar. Na figura 3.11 mostram-se o aspecto geral do equipamento de ensaio e as partes mencionadas.

Os parâmetros envolvidos no ensaio do tipo abrasivo são:

- a) velocidade de deslizamento;
- b) carga aplicada ao corpo de prova;
- c) percurso do deslizamento e
- d) tipo de superfície abrasiva.

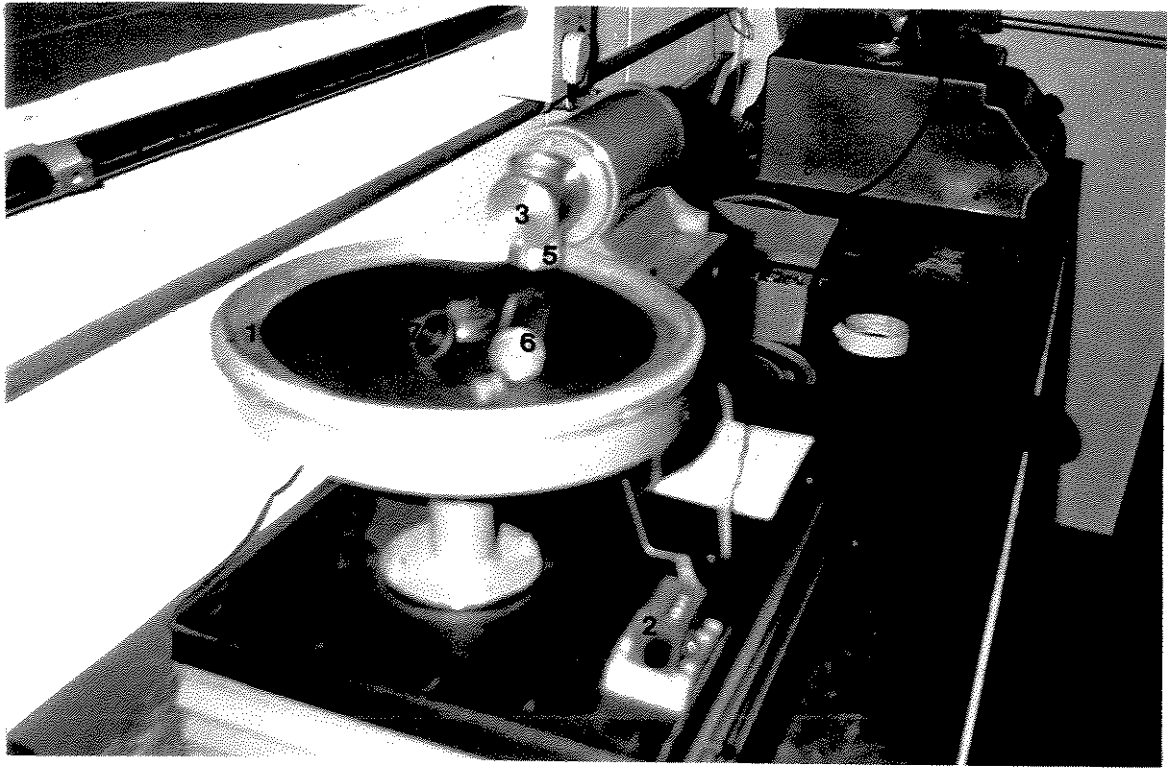


Figura 3.11-Equipamento utilizado no ensaio de resistência ao desgaste, indicando os vários componentes.

Destes parâmetros, variou-se a carga aplicada em dois valores diferentes (300 e 500g), o tipo de superfície abrasiva também em dois valores diferentes (lixa de granulometria 220 e 320), mantendo-se constante a velocidade de deslocamento (53 rpm), o percurso foi variado (máximo 450 m), resultando em quatro condições diferentes para quatro materiais distintos (Al sem reforço e Al-NbC contendo 5, 10, 15%vol NbC).

Corpos cilíndricos de dimensões: diâmetro 10 mm e altura 13 mm foram retirados das barras extrudadas de Al e dos compósitos em três diferentes posições, segundo indicado na figura 3.12 e preparados por usinagem.

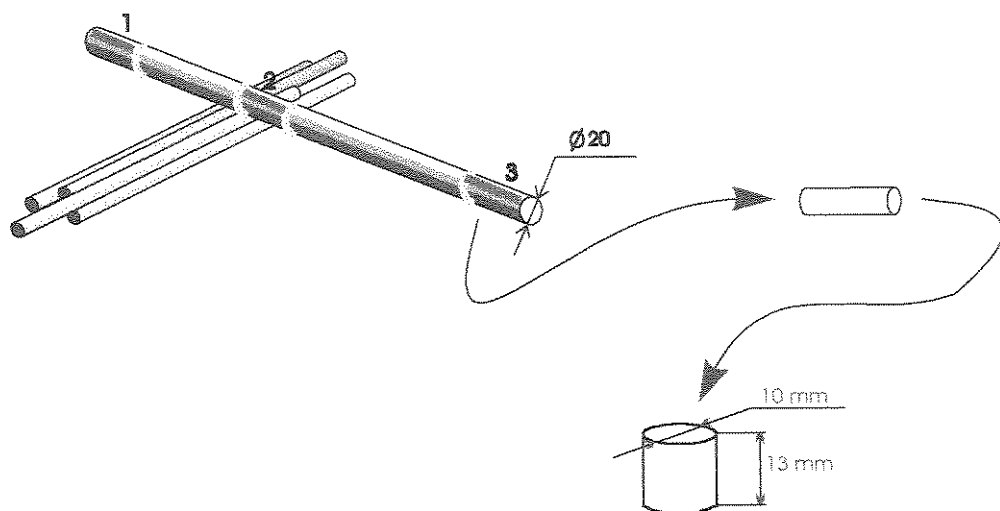


Figura 3.12-Indicação de corte de amostras para o ensaios de resistência ao desgaste.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada condição de ensaio, portanto 12 corpos de prova para cada material estudado, de acordo com planejamento experimental anteriormente apresentado.

Vários métodos podem ser utilizados para avaliação da resistência ao desgaste, podendo-se citar, segundo CRNKOVIC (1993):

- a) método da pesagem;
- b) medidas óticas de mudanças nas características superficiais;
- c) uso de traços rotativos;
- d) coleta de restos de desgaste;
- e) método de medida de corpo de prova.

Neste trabalho utilizou-se para a avaliação da resistência ao desgaste o método da pesagem. Este é um dos processos mais simples de detectar o desgaste, pois permite verificar imediatamente a quantidade de material retirado de forma numérica, pela pesagem do corpo de prova, antes e após o ensaio. São necessárias balanças precisas, uma vez que as mudanças de peso devido ao desgaste são da ordem de poucos miligramas.

Para a execução deste método, o corpo de prova foi previamente limpo com acetona e secado, retirando-se assim a sujeira ou gordura proveniente do manuseio, sendo posteriormente pesado em balança analítica com precisão de décimos de miligramas.

Após o ensaio, o corpo de prova foi novamente limpo e pesado, determinando-se desta forma o peso do material removido. A partir dos dados obtidos foi calculado o coeficiente de desgaste (W), segundo a equação (GAHR, 1987):

$$W = \frac{\Delta m}{\rho A_0 L}$$

$W \Rightarrow$ coeficiente de desgaste

$\Delta m \Rightarrow$ perda de massa

$\rho \Rightarrow$ densidade do material

$A_0 \Rightarrow$ área da seção do corpo de prova

$L \Rightarrow$ distância percorrida

Fundamentos teóricos de ensaios de desgaste são apresentados no Apêndice II.

3.5.3. Ensaios de Dureza

Para a caracterização mecânica da dureza nos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol) e também no Al sem reforço, foram executados testes de macro e micro dureza, segundo norma ABNT NBR-6623.

Na medição de dureza foi necessário utilizar superfícies polidas. Corpos de prova foram retirados de diferentes regiões da barra como ilustra-se na figura 3.13, onde são mostradas também suas dimensões, e lixados na seção circular, até lixa de granulometria 600.

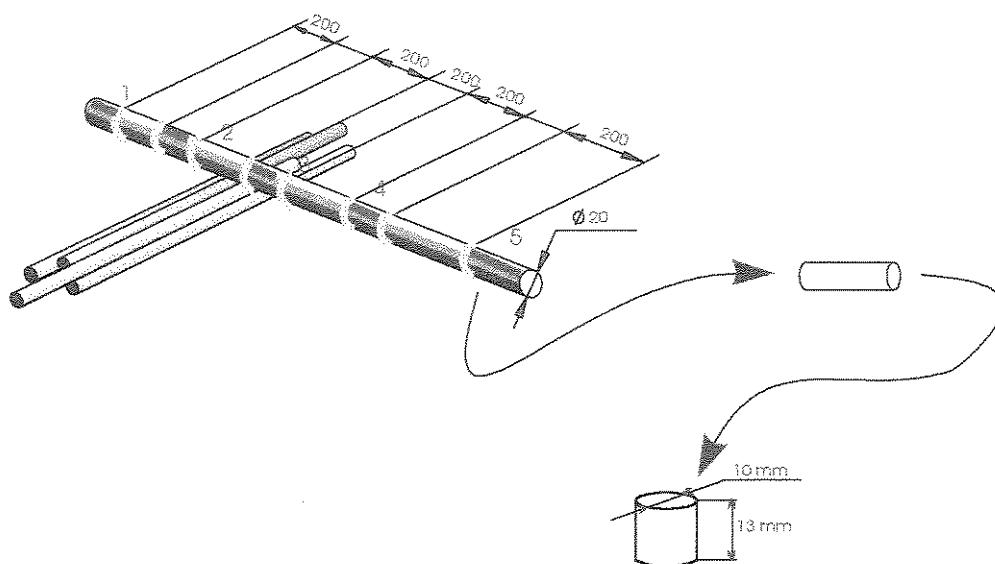


Figura 3.13. Indicação de corte de amostras para o ensaios de dureza.

Macro dureza: O ensaio foi realizado em equipamento *Heckert-WPM*, modelo HPO-250, para dureza *Brinell* e *Vickers*. Este equipamento possui visor com escala milimetrada que permite a medida direta do diâmetro das impressões no copo de prova; tal diâmetro é convertido em valor de dureza pela tabela fornecida pelo fabricante do equipamento, em função da carga aplicada e do diâmetro da esfera utilizada no ensaio.

Foi utilizada carga de 15,61 kg e penetrador esférico de 2,5 mm de diâmetro.

Para cada material foram examinados cinco corpos de prova nos quais foram feitas cinco medições por corpo de prova, com um total de vinte e cinco medições para cada composto e para o Al extrudado, de acordo com o planejamento experimental.

Micro dureza: utilizou-se o método de micro dureza *Vickers*, para medir os valores de dureza separadamente da matriz e do reforço. O ensaio foi realizado no banco metalográfico Neophot 32, com aplicação de carga de 20 gf para a partícula de reforço NbC, por 15 s e de 10 gf para a matriz de Al, também com tempo de aplicação de 15 s. Realizaram-se dez medições

diferentes para a matriz de cada compósito e dez medidas também para o reforço, em cada compósito analisado, e também para o Al sem reforço.

Nas marcas feitas pelo penetrador de forma rômbrica, mediu-se as duas distâncias (d_1 e d_2), segundo figura 3.14, com ajuda do analisador de imagens, proporcionando uma maior precisão na medição.

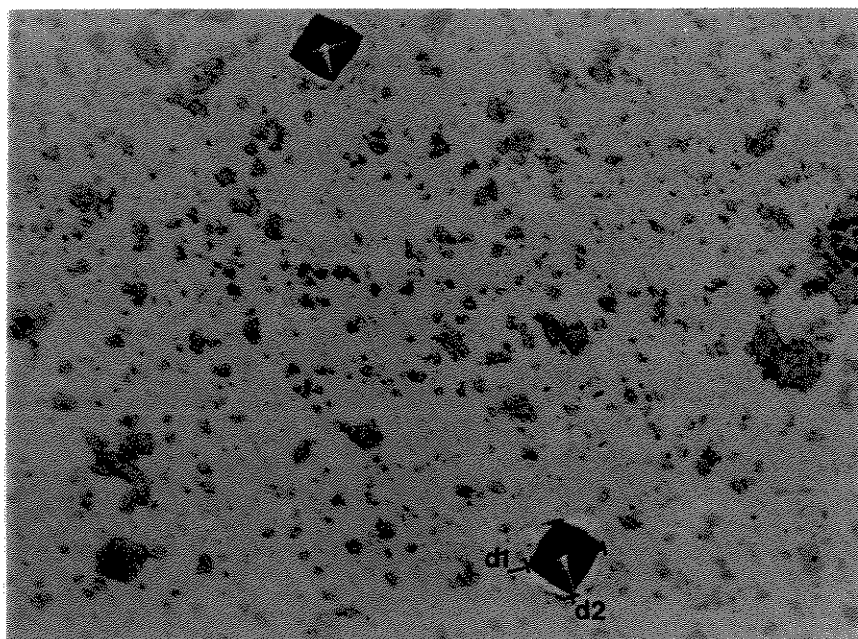


Figura 3.14. Marca feita pelo penetrador na matriz de Al, no ensaio de microdureza na matriz dos compósitos Al-NbC.

Segundo manual do equipamento a dureza *Vickers* é dada pela relação:

$$HV = \frac{1854,4 \times vc}{d^2}$$

- 1854,4 $\Rightarrow$ Constante
- $vc \Rightarrow$ valor da carga (g)
- $d \Rightarrow$ valor médio (d_1 e d_2)
- $HV \Rightarrow$ microdureza Vickers ($\text{g}/\mu\text{m}$)

3.6. Ensaio de Expansão Térmica

A expansão térmica é uma propriedade interessante a ser medida nos compósitos Al-NbC devido às características refratárias do reforço NbC.

Este ensaio realizou-se no Laboratório de Fibras Óticas, do Instituto de Física da UNICAMP, no qual foram analisados os três compósitos de Al-NbC (5,10,15%vol), e amostras de Al sem reforço.

Foram retirados quatro corpos de provas de cada compósito e do Al sem reforço, segundo posições indicadas na figura 3.15. As dimensões dos corpos de prova podem ser observadas na mesma figura.

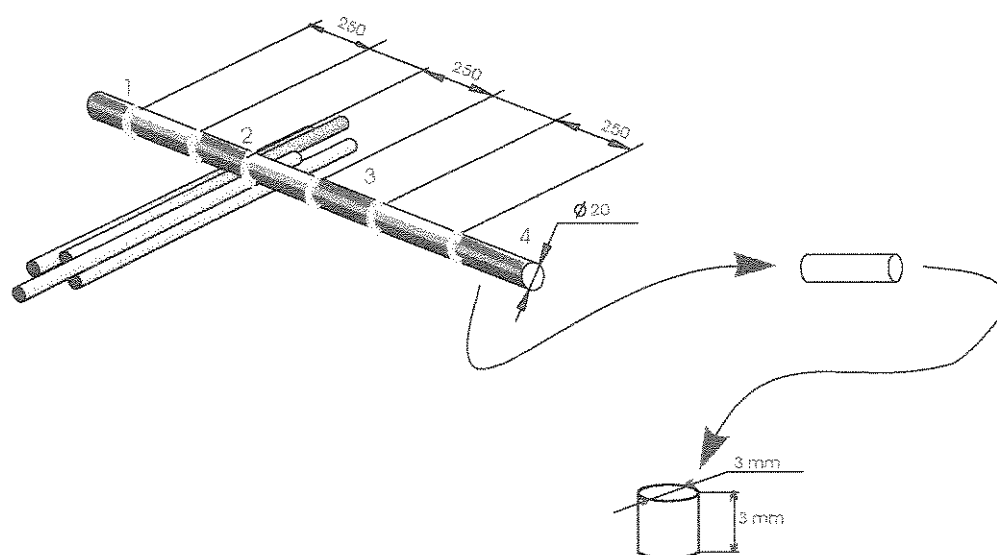


Figura 3.15- Indicação de corte de amostras para o ensaios de expansão térmica.

O equipamento utilizado para este ensaio foi um analisador termomecânico marca SHIMADZU, modelo TMA-50, com as seguintes especificações:

- a) Faixa de medição da temperatura $\Rightarrow$ desde temperatura ambiente até 1000 °C.
- b) Dimensões de corpos de prova $\Rightarrow$ $\varnothing$ 8x20 mm ou menores, $\varnothing$ 5x20 mm, etc.
- c) Carga padrão $\Rightarrow$ 0 ~ $\pm$ 500g
- d) Deslocamento do detetor $\Rightarrow$ L.V.D.T (*linear variable diferencial transformer*) Transformador diferencial da variável linear.
- e) Sensibilidade da medição $\Rightarrow$ 0,1 μ m (deslocamento), 10 mg (carga)

- f) Precisão da medição $\Rightarrow \pm 1\%$ para cada faixa.
- g) Tipos de teste $\Rightarrow$ Expansão, Penetração e Alongamento.
- h) Saída com sinal digital
- i) *Hardware* para controle de temperatura.
- j) *Software* para controle de temperatura.

A figura 3.16 apresenta fotografia do analisador termomecânico, SHIMADZU/ TMA-50, utilizado no trabalho.

Fundamentos teóricos referentes a expansão térmica são apresentados no Apêndice III.

3.7. Caracterização da Densidade Aparente

Realizaram-se medidas de densidade aparente para o Al puro e os diferentes compósitos analisados de Al-NbC (5, 10, 15%vol), nos mesmos corpos de provas utilizados nos ensaios de desgaste. Escolheram-se quinze corpos de provas aleatoriamente de cada material. Amostras foram medidas, com o objetivo de calcular o volume, utilizando-se um micrômetro com precisão de 0,001 μm , limpas com acetona e secadas com ar quente e em seguida submetidas à pesagem. Utilizou-se uma balança com precisão de décimos de miligramas.

Foram então calculadas as densidades aparentes a partir dos volumes e pesos medidos.

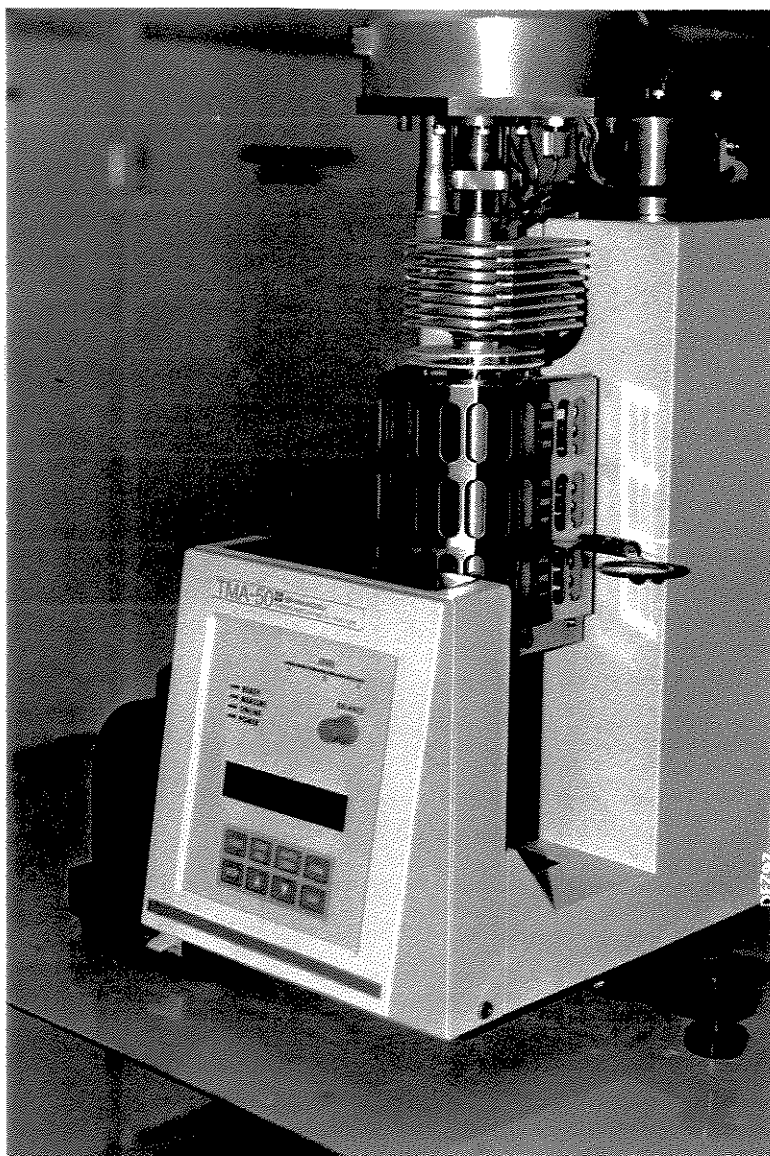


Figura 3.16-Fotografia do analisador termomecânico marca SHIMADZU, modelo TMA-50, utilizado no trabalho.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

4.1. Caracterização Metalúrgica dos Compósitos Al-NbC

4.1.1. Caracterização Macroestrutural

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam macrografias dos compósitos Al- 5, 10 e 15% vol NbC, respectivamente. São apresentadas três regiões: extremidade inicial, meio, e extremidade final da barra extrudada.

Na figura 4.1, apresentando macrografias do compósito Al-NbC (5%vol), pode ser observada uma borda relativa à caneca onde foram compactados os pós; esta caneca de liga AA 6063 foi extrudada juntamente com o compósito. A borda apresenta espessura variável conforme a posição da barra: é mais espessa no início do processo de extrusão, diminuindo a medida que este avança, indicando um maior esforço no começo do processo. A caneca recebe as forças de atrito entre a matriz de extrusão e o material sendo conformado, evitando danos na superfície do compósito.

Nas macrografias não se nota heterogeneidades na distribuição do reforço, a qual se mostra aparentemente semelhante em toda a seção da barra, nas três posições observadas.

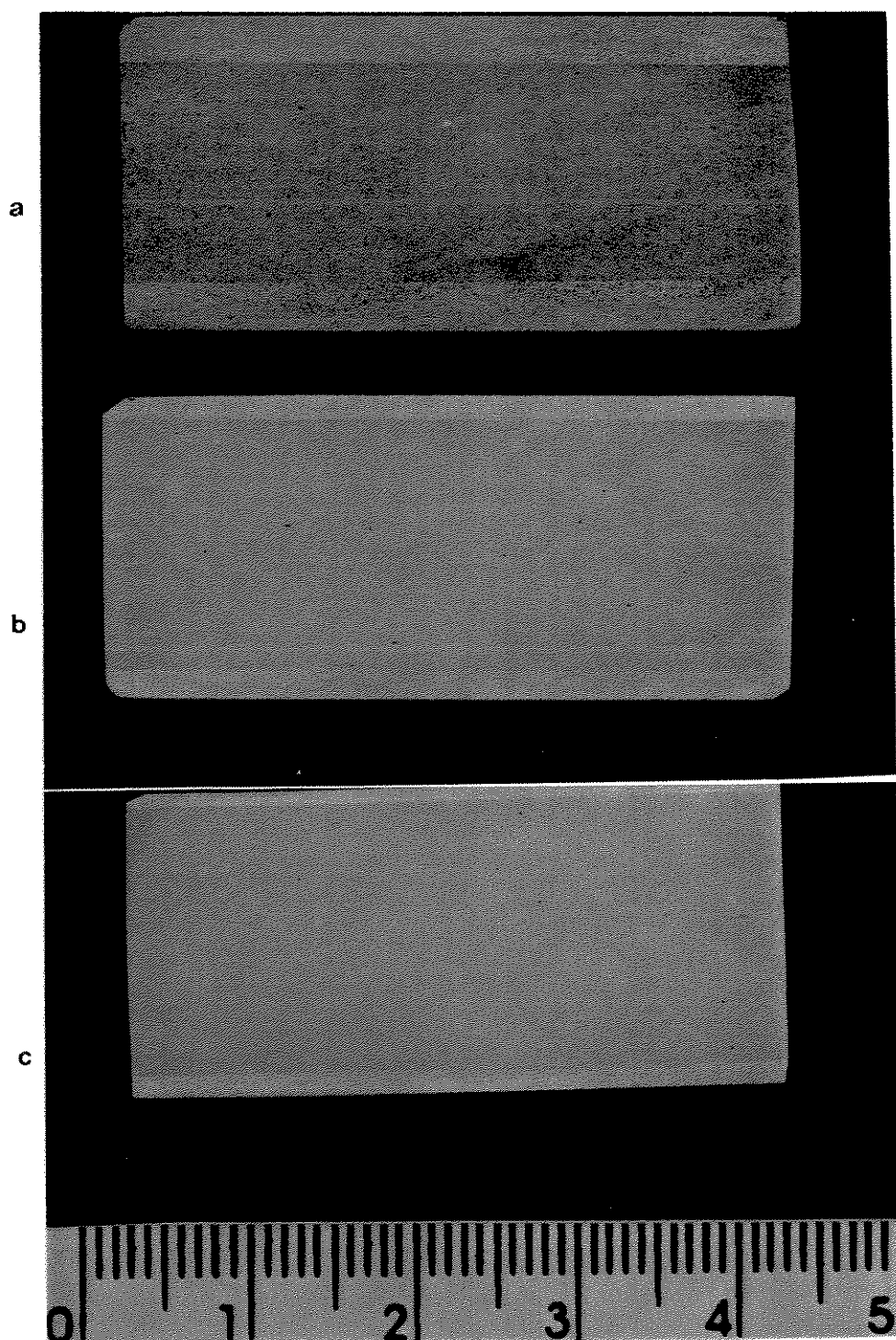


Figura 4.1-Macroestruturas do compósito Al-NbC (5% vol); corte longitudinal de três regiões diferentes da barra extrudada: a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.

A figura 4.2 apresenta macrografias do compósito Al-NbC (10% vol), enquanto a figura 4.3 apresenta macrografias do compósito Al-NbC (15% vol).

Pode-se notar também nestes casos a presença de uma superfície de Al 6063, originada do recipiente utilizado para conter a mistura de pós compactada, de espessura dependente da posição na barra extrudada. Novamente a parede de Al previne o atrito entre a matriz de extrusão e o compósito.

Pode-se observar nas macrografias a presença de NbC, homogeneamente distribuída por toda a seção da barra; não se notam variações de distribuição de partículas com a posição na barra extrudada.

Não se nota também alinhamento das partículas de reforço na direção da extrusão, indicando que os esforços de conformação foram totalmente empregados para a compactação do material.

Para as macrografias do compósito Al-NbC 15% vol, foi impossível obter fotografias da extremidade inicial, por apresentar na seção da barra extrudada muita quantidade da liga utilizada na confecção das canecas e tampas, questão que impossibilitou a observação do compósito.

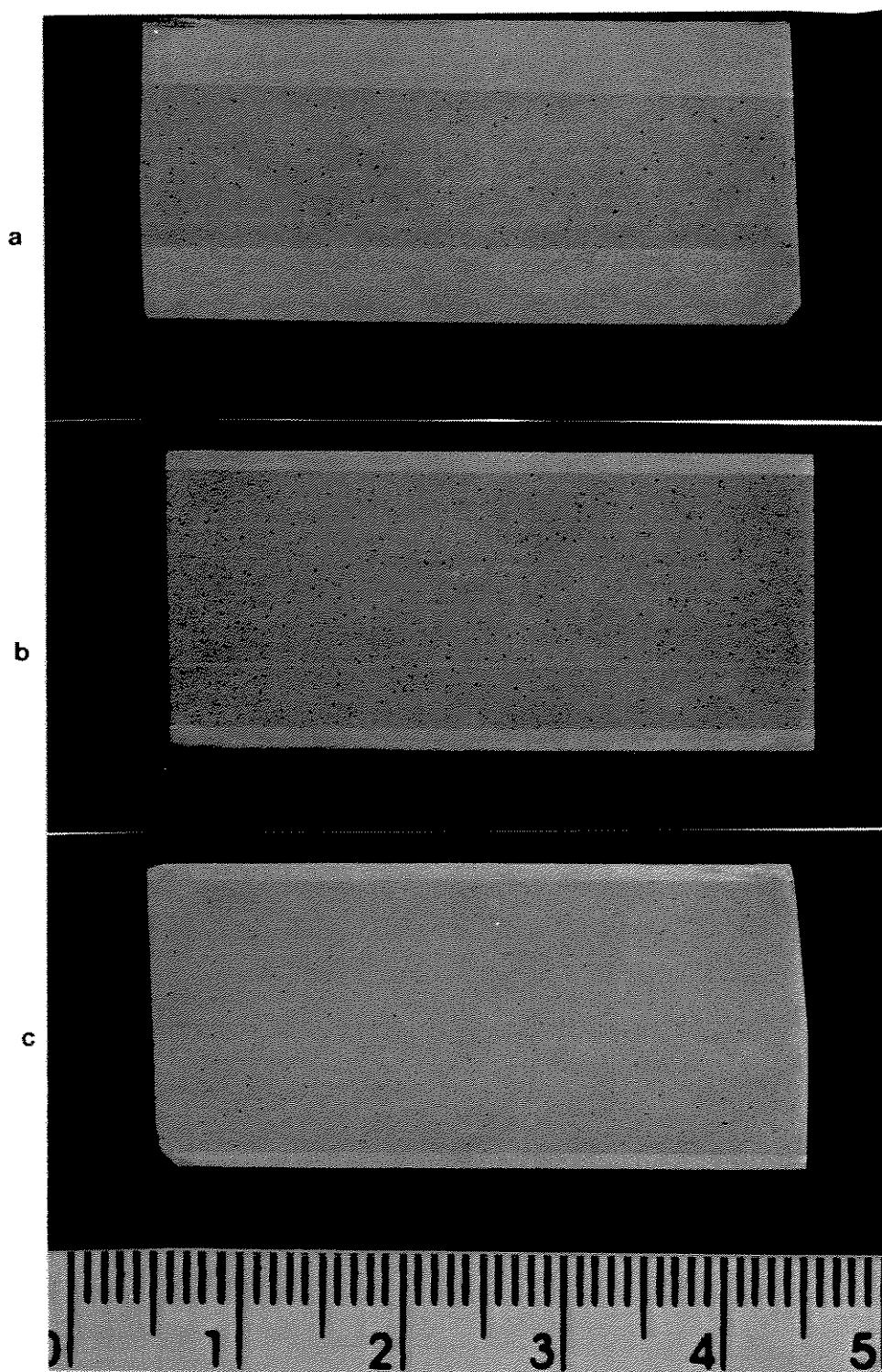


Figura 4.2-Macroestrutura do compósito Al-NbC (10% vol); corte longitudinal de três regiões diferentes da barra extrudada:
a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final

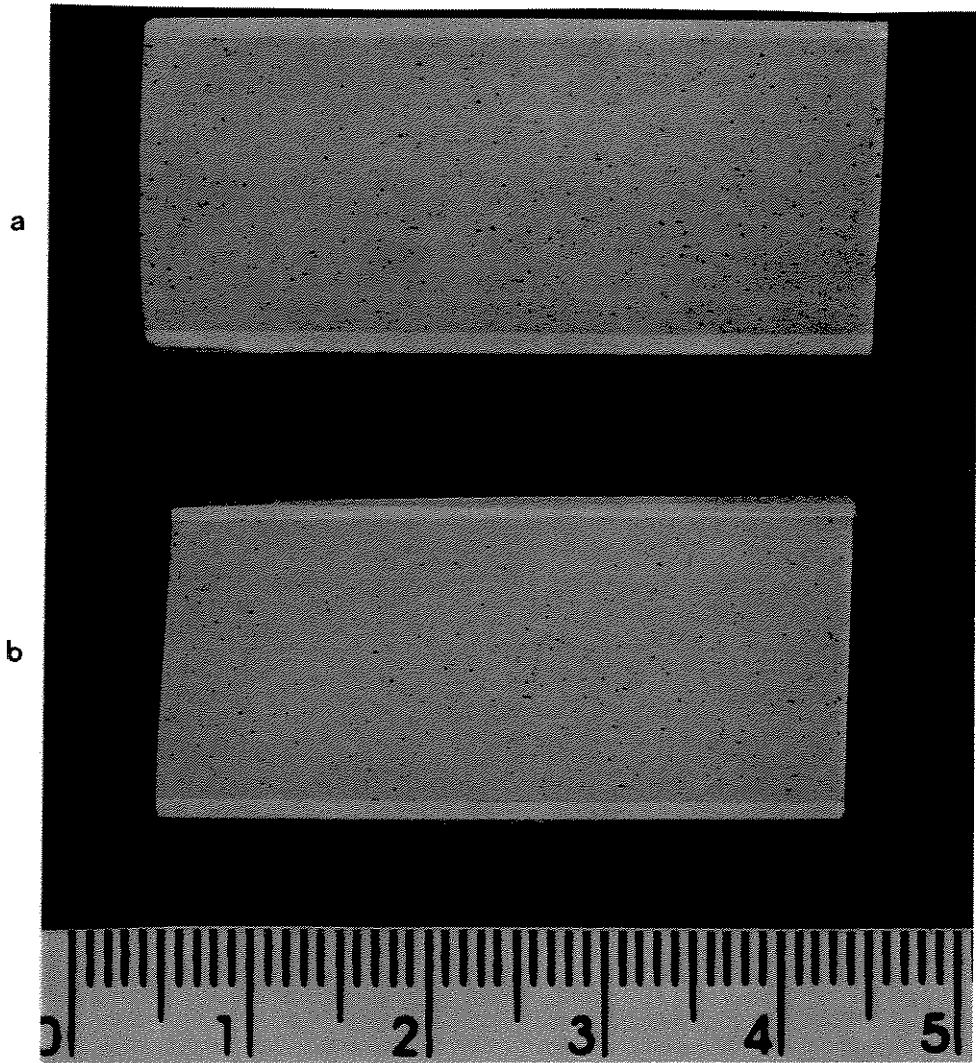


Figura 4.3-Macroestrutura do compósito Al-NbC (15% vol); corte longitudinal de duas regiões diferentes da barra extrudada:
a) meio b) extremidade final

4.1.2. Caracterização Microestrutural

A) Al sem Reforço

Como explicado anteriormente, foi produzida barra de Al extrudada a partir da mesma matéria prima (pó de Al) e seguindo os mesmos procedimentos empregados para a produção dos compósitos Al-NbC. Este material é utilizado no trabalho como referência, para análise do efeito da adição de partículas NbC nas características mecânico-metalúrgicas do Al.

A figura 4.4 apresenta a microestrutura da barra de Al, sem adição do reforço NbC.

Pode ser observada estrutura típica de material produzido por técnica de metalurgia do pó. As partículas do pó de Al foram sinterizadas, formando uma matriz sólida de Al, com algumas partículas bem distribuídas de cor preta que pertencem à camada de óxido que recobria o Al na forma de pó e agora foram quebradas pelo processo de extrusão, distribuindo-se como partículas independentes. Não são observadas porosidade e outros defeitos.

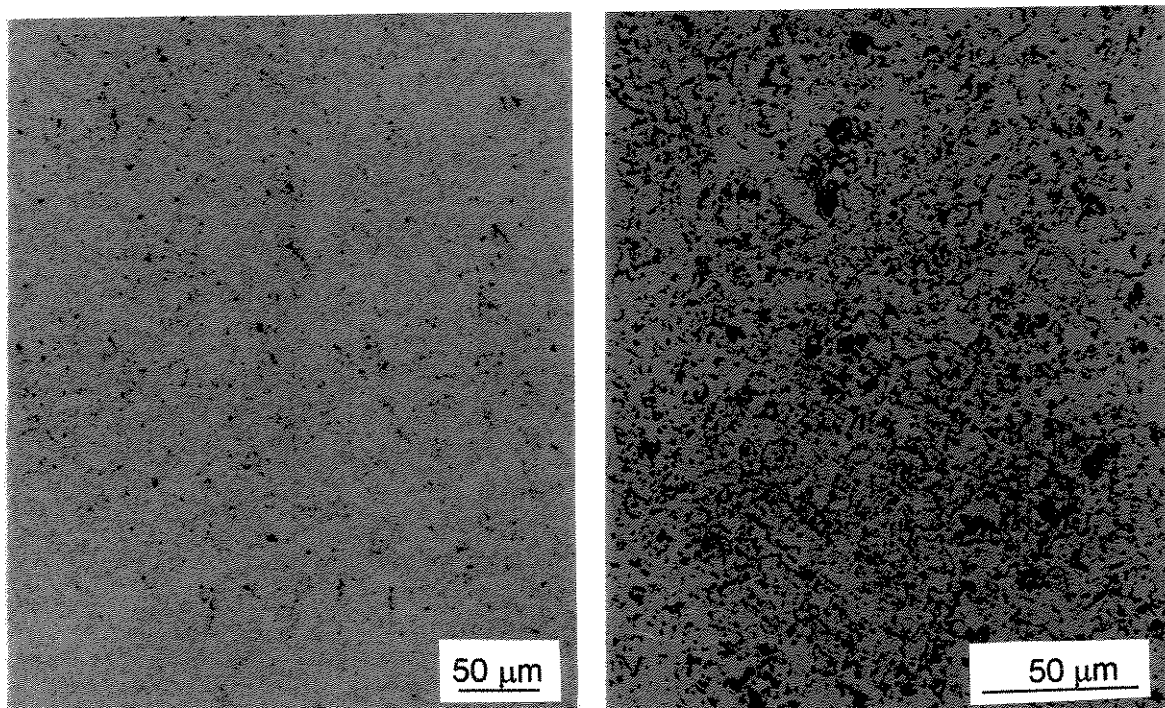


Figura 4.4-Microestrutura do Al-barra extrudada a partir de pó compactado. (Microscopia Ótica: MO)

B) Compósito Al-NbC (5% vol)

A figura 4.5 apresenta microestruturas do compósito Al-NbC (5% vol) nas diferentes regiões analisadas da barra extrudada, obtidas por microscopia ótica.

Pode ser observada a distribuição do reforço NbC de forma bastante uniforme pela matriz de Al, nas diferentes regiões da barra; característica positiva para o comportamento mecânico dos compósitos.

A figura 4.6 apresenta a microestrutura típica do compósito Al-NbC (5% vol) fotografada em microscópio eletrônico. Em a) pode-se observar a boa dispersão das partículas de NbC, com pouca tendência à aglomeração: a maioria das partículas apresenta-se como indivíduos isolados.

A microestrutura mostra ainda ausência de porosidade e ausência de orientação da distribuição das partículas de reforço, indicando que os esforços de extrusão foram totalmente transferidos para a compactação do material.

A figura 4.6 b) apresenta com maior detalhe a partícula NbC, nota-se na partícula de NbC uma ruptura desta, demonstrando a alta dureza do reforço, as quais podem quebrar-se devido aos esforços de compactação durante a extrusão.

Não se nota reação de interface entre a partícula e a matriz de Al, o que não é também observado com maior aumento, segundo indicado na figura 4.6 c).

Microanálise foi efetuada para a análise de eventuais alterações na composição da partícula de reforço ou da matriz em sua proximidade que indicassem reações ou difusão entre os 2 constituintes do material.

Os pontos de microanálise são mostrados na figura 4.7 enquanto os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.1 (média de 5 pontos para cada região-partícula do reforço, matriz).

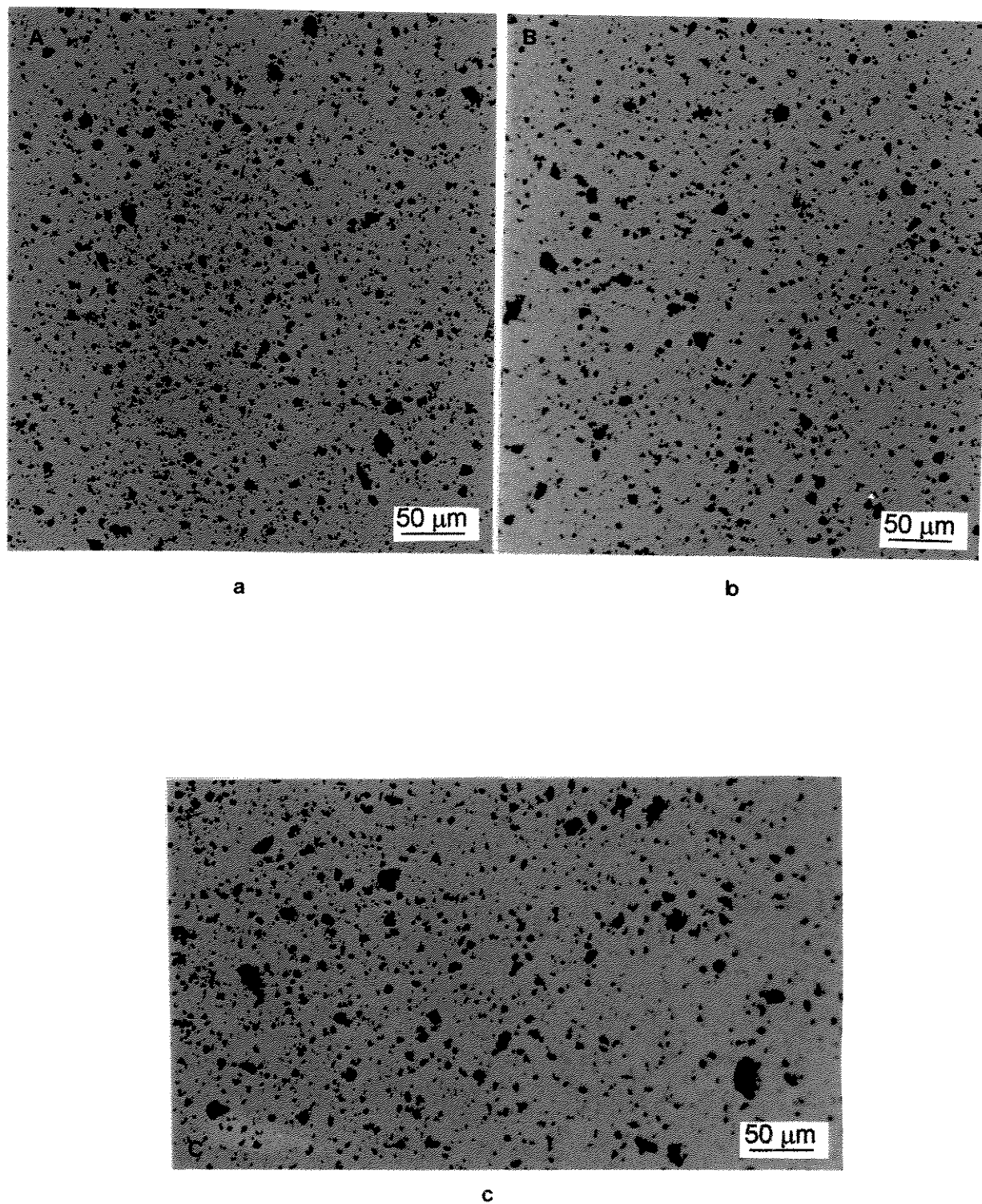


Figura 4.5-Microestrutura do compósito Al-NbC 5% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO) a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.

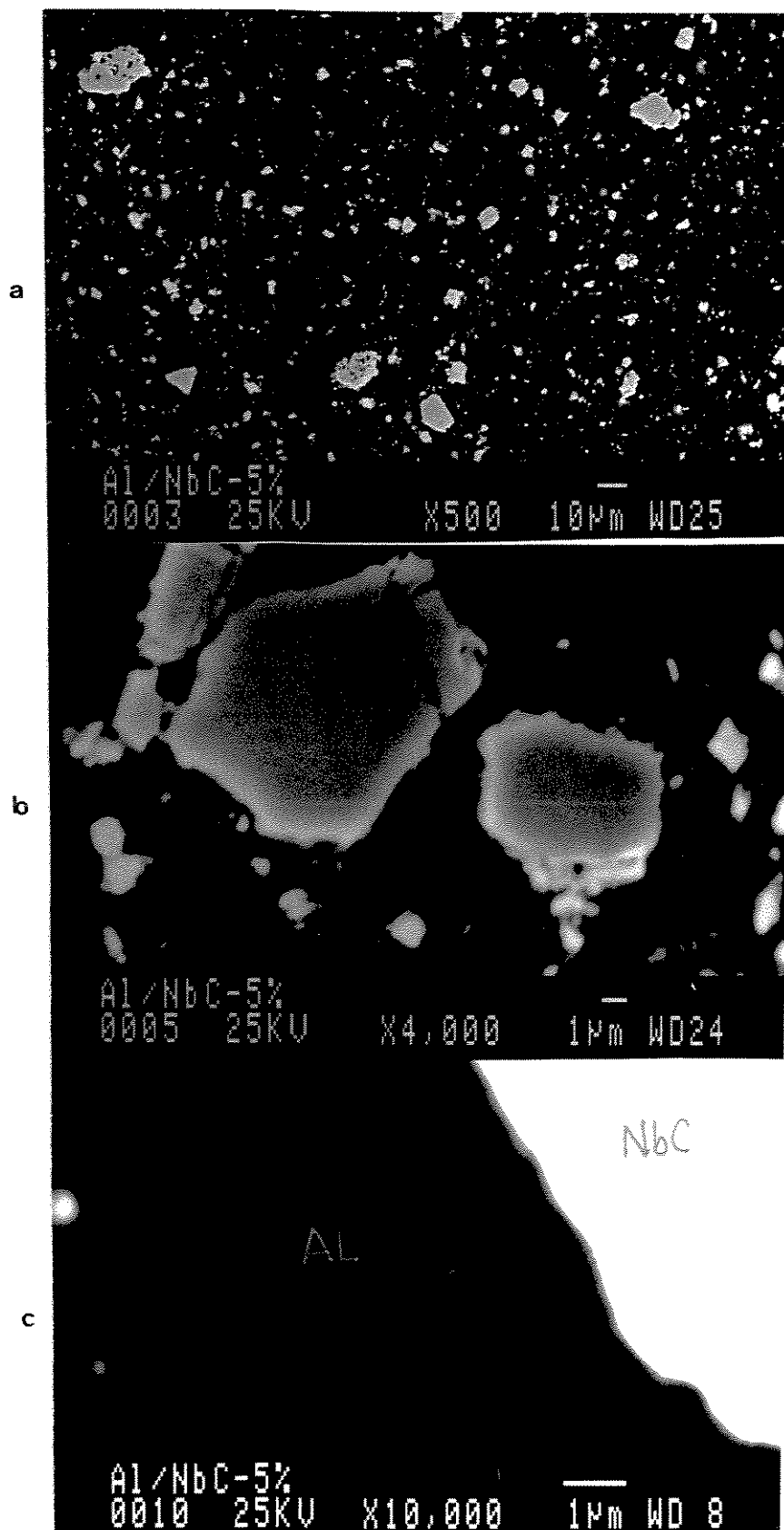


Figura 4.6-Microestrutura típica do compósito Al-NbC 5% vol: a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe de interface matriz/reforço. (MEV)

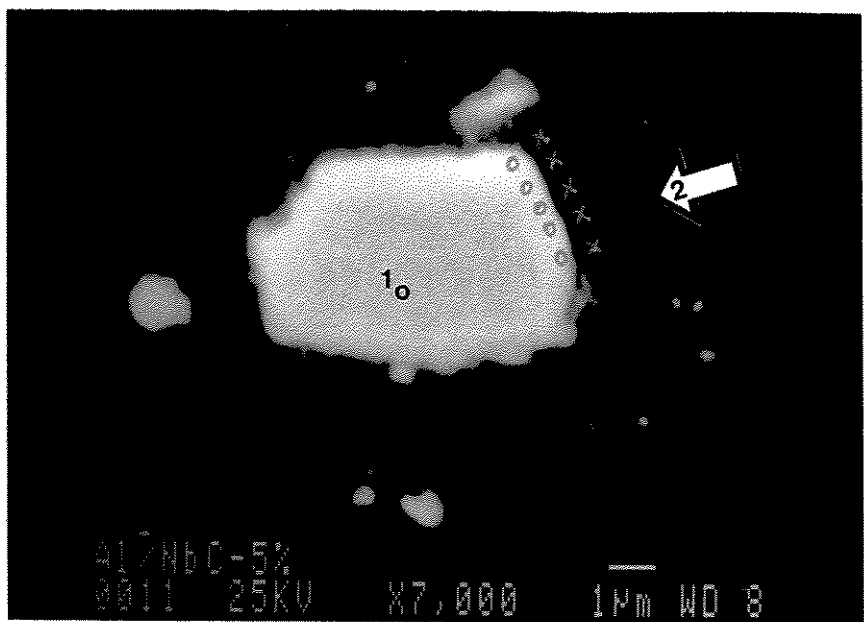


Figura 4.7-Microestrutura do compósito Al-NbC 5% vol indicando pontos de microanálise.(MEV)

Na tabela 4.1 é também apresentado resultado de análise química geral do compósito.

Tabela 4.1- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (5%vol).

ANÁLISE PONTUAL (Al-NbC 5%vol)		
POSIÇÃO	%wt Al	%wt Nb
① Partícula de NbC	0,65±0,10	99,35±0,10
② Matriz de Al	98,95±0,10	1,05±0,10
Análise Geral do Compósito Al-NbC (5% vol)	94,53±0,10	5,47±0,10

OBS: As porcentagens são relativas Al/Nb; não são considerados outros elementos presentes. O elemento C não foi analisado por se tratar de elemento leve, não detectável nas condições de ensaio disponíveis.

Os resultados indicam a ausência de fases estranhas formadas por reação Al-Nb. O teor de Al nas partículas de NbC e de Nb na matriz de Al, pode ser explicado pela imprecisão da análise; levando em conta o diâmetro do feixe de elétrons de análise, ou seria indicativo de alguma difusão. Uma melhor análise da interface deve ser feita utilizando microscopia eletrônica de transmissão.

C) Compósito Al-NbC (10%vol)

A figura 4.8 apresenta microestruturas do compósito Al-NbC (10% vol) nas diferentes regiões da barra extrudada, obtidas por microscopia ótica.

Pode ser observada também, a distribuição do reforço NbC de forma bastante uniforme pela matriz de Al, com uma maior quantidade que o anterior e alguma tendência à aglomeração das partículas de NbC.

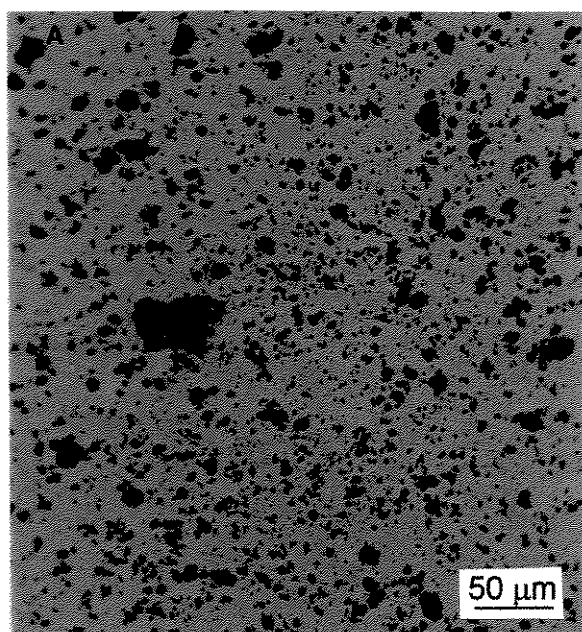
A figura 4.9 apresenta a microestrutura típica do compósito Al-NbC (10% vol) fotografada em microscópio eletrônico. Em a) pode-se observar boa dispersão das partículas de NbC, com alguma tendência à aglomeração

A microestrutura mostra ainda ausência de porosidade e ausência de orientação da distribuição das partículas de reforço, como já observados para o compósito 5% vol NbC.

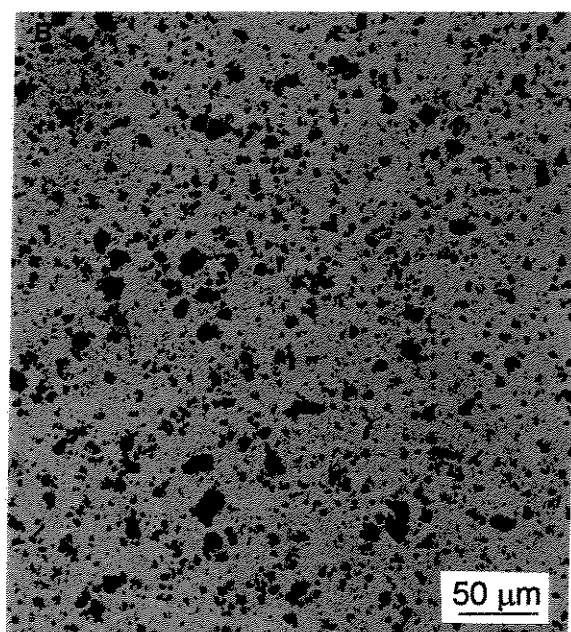
A figura 4.9 b) apresenta com maior detalhe a partícula NbC, também observa-se ruptura da partícula, demonstrando a fragilidade do NbC.

Para verificar se existe alguma reação química na interface matriz-reforço, por meio do MEV aumenta-se até 10 000 vezes a interface, sendo o resultado não muito satisfatório, pois a imagem não proporcionou uma boa definição e não se nota reação de interface entre a partícula e a matriz de Al, segundo indicado na figura 4.6 c).

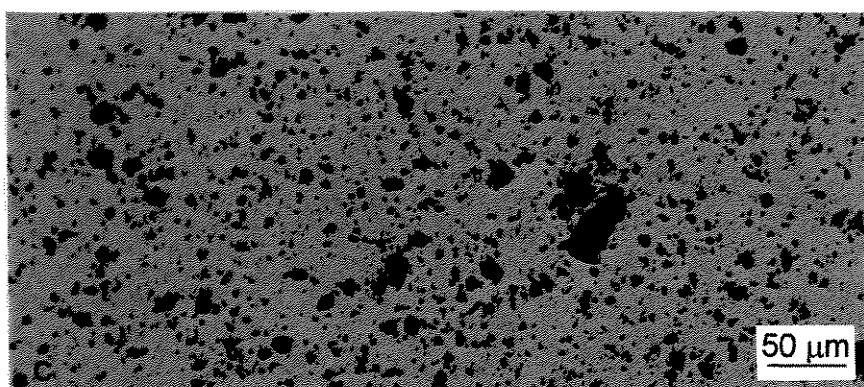
Microanálise foram efetuadas segundo pontos mostrados na figura 4.9 c) sendo os resultados obtidos apresentados na tabela 4.2.



a



b



c

Figura 4.8-Microestrutura do compósito Al-NbC 10% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO) a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.

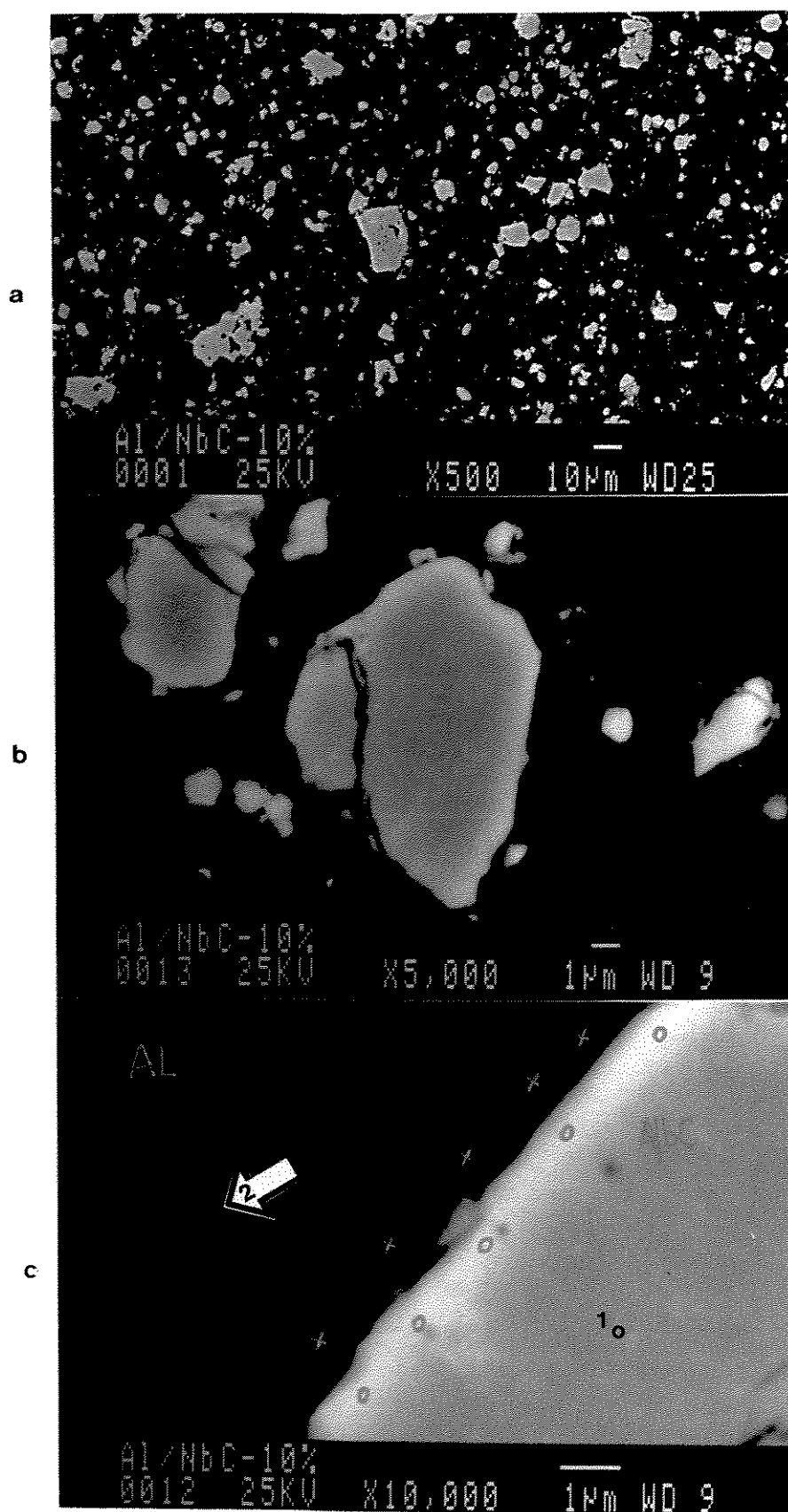


Figura 4.9-Microestrutura típica do compósito Al-NbC 10% vol: a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe de interface matriz/reforço. (MEV)

A tabela 4.2 também apresenta resultado de análise química geral do compósito Al-NbC 10% vol.

Tabela 4.2- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (10%vol).

ANÁLISE PONTUAL (Al-NbC 10%vol)		
POSIÇÃO	%wt Al	%wt Nb
① Partícula de NbC	1,04±0,10	98,96±0,10
② Matriz de Al	100	0
Análise Geral do Compósito Al-NbC (10% Vol)	85,22±0,02	14,78±0,01

OBS: As porcentagens são relativas Al/Nb; não são considerados outros elementos presentes. O elemento C não foi analisado por se tratar de elemento leve, não detectável nas condições de ensaio disponíveis.

Os resultados indicam a ausência de fases estranhas formadas por reações Al-Nb. Novamente pode-se considerar não conclusiva a existência ou não de difusão entre o Al e a partículas do reforço.

D) Compósito Al-NbC (15%vol)

A figura 4.10 apresenta microestruturas do compósito Al-NbC (15% vol) nas diferentes regiões analisadas da barra extrudada, obtidos por microscopia ótica.

Pode ser observada a distribuição do reforço NbC de forma bastante homogênea nas diferentes regiões da barra; aglomerações são agora mais freqüentemente presentes.

A figura 4.11 apresenta a microestrutura típica do compósito Al-NbC (15% vol) fotografada em microscópio eletrônico. Em a) pode-se observar a

presença de partículas por toda a seção, com algumas aglomerações já acentuadas.

Estas aglomerações são consequência da porcentagem elevada de NbC neste tipo de compósito com fração volumétrica 15%; observa-se com maior detalhe a aglomeração na figura 4.11 b).

Não se nota reação de interface entre a partícula e a matriz de Al, o que não é também observado com maior aumento, segundo indicado na figura 4.11 c).

Microanálise foi também efetuada para a análise de eventuais alterações na composição da partícula de reforço ou da matriz em sua proximidade.

Os pontos de microanálise são mostrados na figura 4.12 enquanto os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.3 (média de 5 pontos para cada região-partícula do reforço, matriz), feitos de maneira semelhante à dos compósitos Al-NbC (5 e 10% vol).

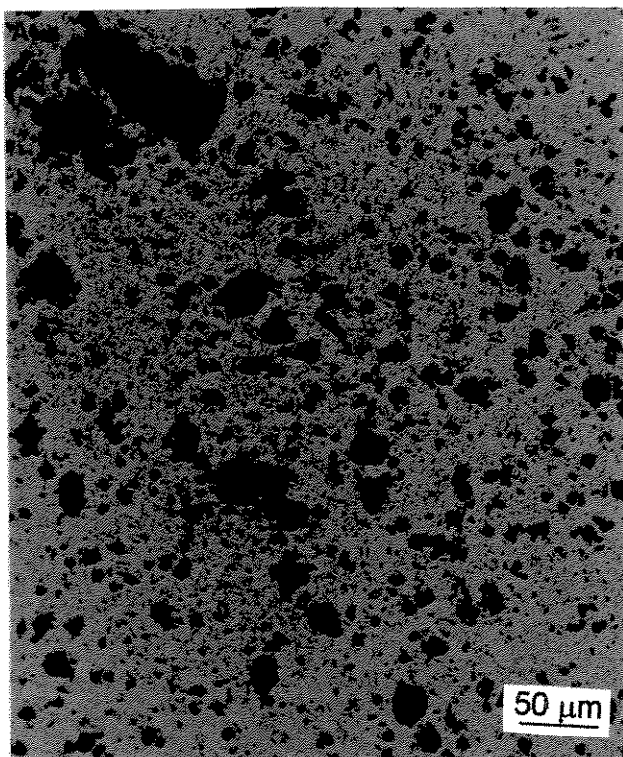
A tabela 4.2 também apresenta resultado de análise química geral do compósito Al-NbC 10% vol.

Tabela 4.3- Resultados da microanálise feita no compósito Al-NbC (15%vol).

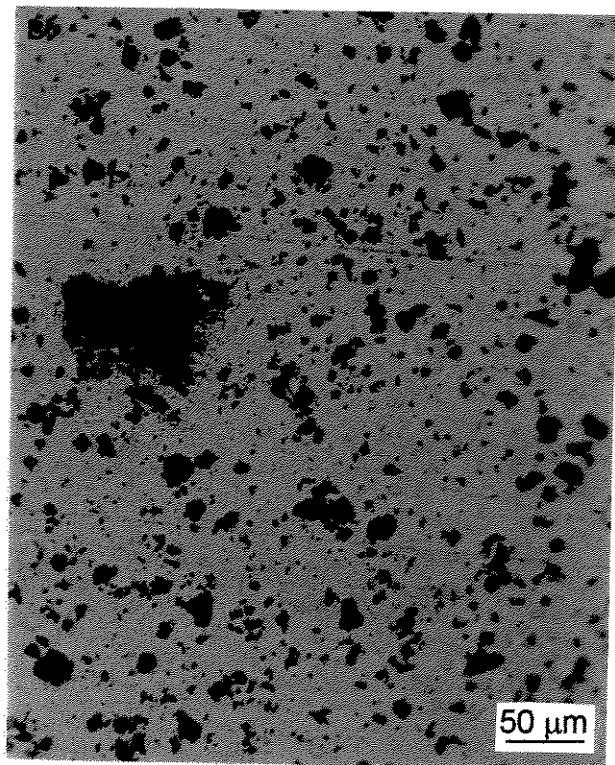
ANÁLISE PONTUAL (Al-NbC 15%vol)		
POSIÇÃO	%wt Al	%wt Nb
① Partícula de NbC	0,62±0,10	99,38±0,10
② Matriz de Al	98,71±0,30	1,29±0,30
Análise Geral do Compósito Al-NbC (15% Vol)	80,82±0,02	19,18±0,20

OBS: As porcentagens são relativas Al/Nb; não são considerados outros elementos presentes. O elemento C não foi analisado por se tratar de elemento leve, não detectável nas condições de ensaio disponíveis.

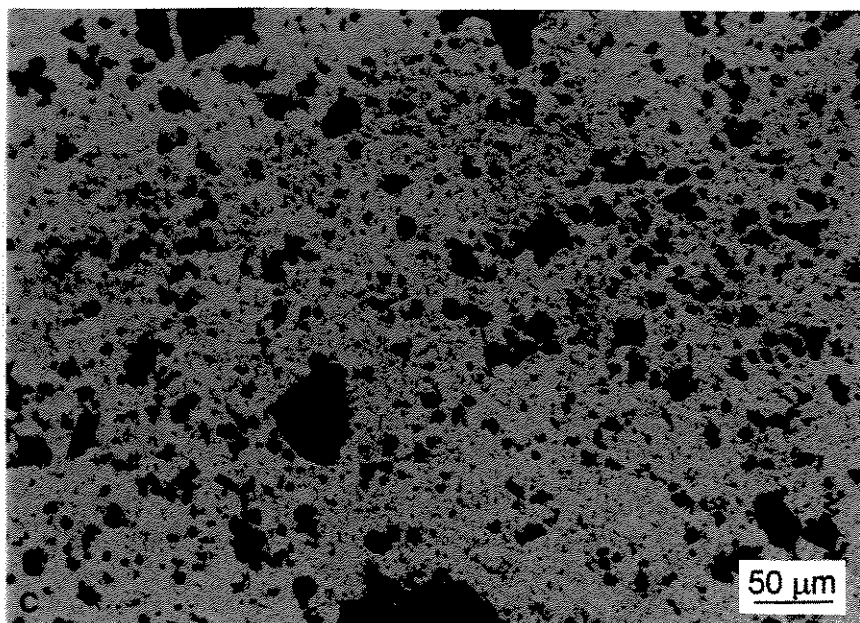
Como nos casos anteriores, não são detectados fases estranhas que indiquem reações entre a matriz e o reforço.



a



b



c

Figura 4.10-Microestrutura do compósito Al-NbC 15% vol, em diferentes regiões da barra extrudada. (MO). a) extremidade inicial b) meio c) extremidade final.

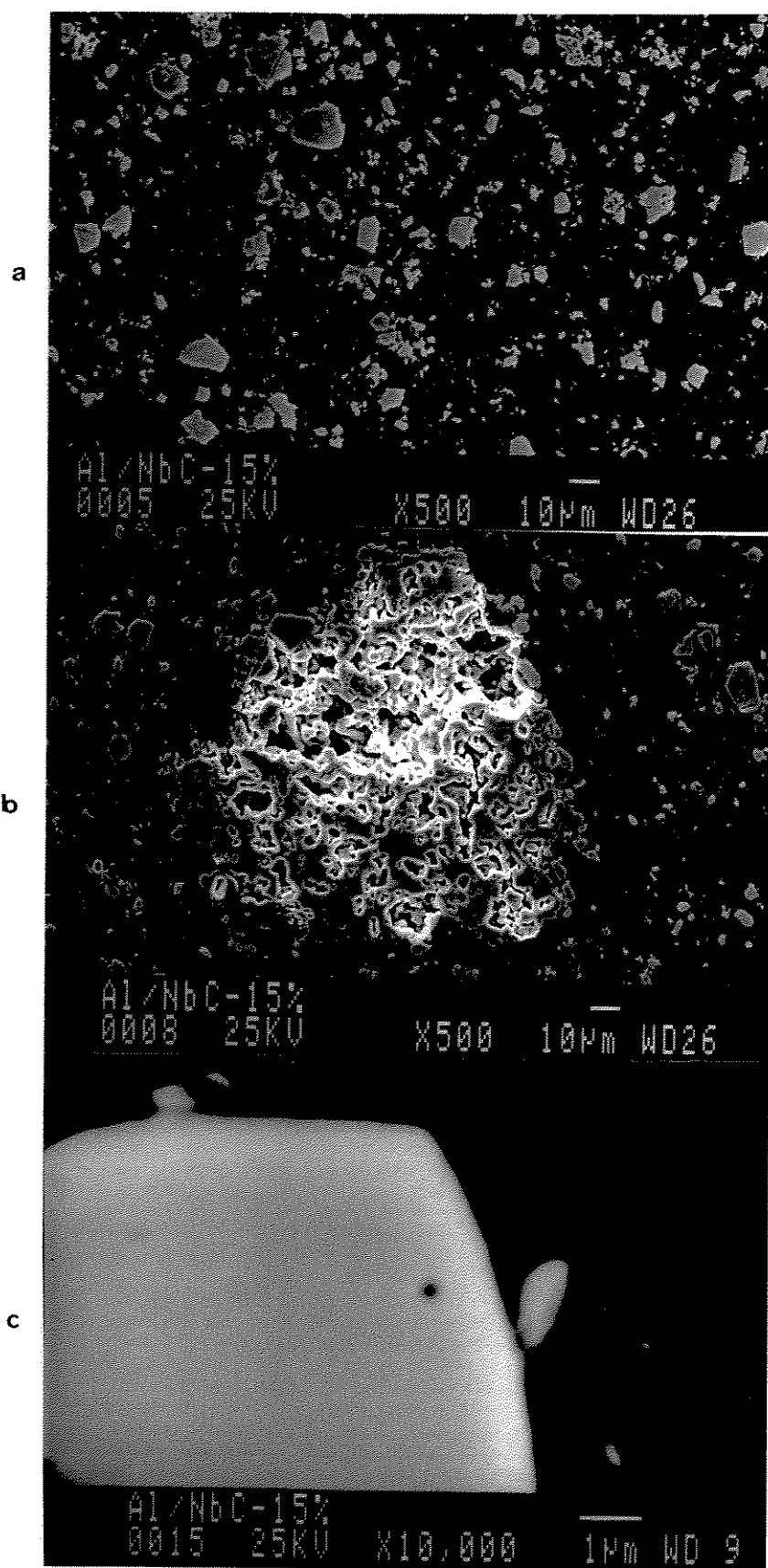


Figura 4.11-Microestrutura típica do composto Al-NbC 15% vol:
a) vista geral; b) detalhe de partículas NbC; c) detalhe
de interface matriz/reforço. (MEV)

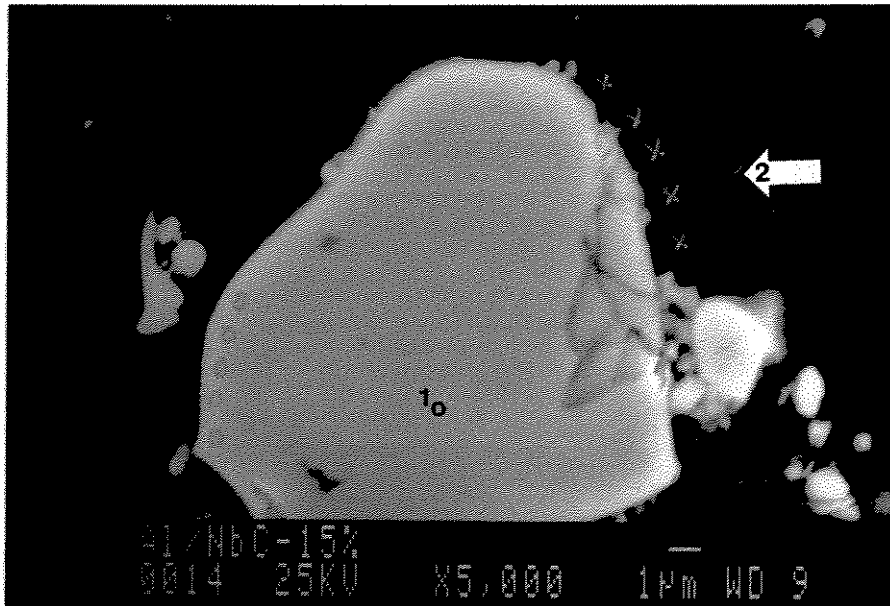


Figura 4.12-Microestrutura do compósito Al-NbC 15% vol indicando pontos de microanálise.(MEV)

E) Comparação das Microestruturas dos Compósitos Al-NbC (5,10,15% vol)

A respeito das microestruturas, de forma geral podem ser feitas algumas considerações:

- a) Os compósitos apresentam distribuição do reforço semelhantes nas diferentes regiões da barra extrudada.
- b) Nas interfaces observadas pelo MEV, não se detectou fenômenos de reação Reforço-Matriz, não sendo observadas quaisquer fases distintas de Al ou NbC.
- c) As partículas do reforço, no caso de maior número, tendem à aglomeração, formando pacotes que podem ser prejudiciais no comportamento mecânico do compósito.

A tabela 4.4 apresenta resumo das análises gerais dos diferentes compósitos.

Tabela 4.4- Microanálises gerais dos compósitos Al-NbC (5, 10 e 15%vol).

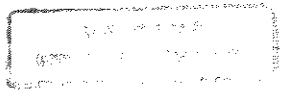
	Porcentagens de reforço em vol		
Elementos	5%	10%	15%
%wt Al	94,53±0,1	85,22±0,02	80,82±0,02
%wt Nb	5,47±0,1	14,78±0,01	19,18±0,2

Os resultados gerais obtidos indicam que as diferentes regiões das barras extrudadas apresentam a mesma porcentagem do reforço, o que garante a confiança na caracterização mecânicas a ser efetuadas.

4.1.3. Análise das Partículas do Reforço nos Compósitos

Para cada compósito Al-NbC (5,10,15% vol), analisou-se a distribuição do diâmetro das partículas NbC e o número de partículas presentes em dez regiões de três amostras de cada compósito. Foram, portanto, analisadas 90 regiões, sendo a área de cada região de 0,38 mm².

Objetivou-se observar, em primeiro lugar, o comportamento das partículas do reforço durante o processamento dos compósitos: com a análise do diâmetro pretendeu-se analisar a possibilidade de reações que reduzissem ou aumentassem suas dimensões e também a possibilidade de ruptura de partículas em extensão suficiente para alterar suas dimensões.



Objetivou-se ainda analisar a distribuição macroscópica das partículas de reforço nos compósitos produzidos.

A) Diâmetros de Partículas do Reforço nos compósitos

A tabela 4.5 mostra resultados da distribuição de valores de diâmetros de partículas individuais de NbC nos três compósitos produzidos, obtidos com auxílio de analisador de imagens e *software* apropriado, como descrito anteriormente.

A tabela 4.5 mostra também o número de partículas contadas por intervalo pré-estabelecido de valores de diâmetro de partículas. Foram utilizados 60 intervalos, com um valor de incremento entre cada intervalo, de 0,167µm.

Tabela 4.5- Resultados da contagem de partículas em trinta áreas diferentes de cada compósito Al-NbC (5, 10, 15% vol), classificadas de acordo com seu diâmetro equivalente.

Número do intervalo	Diâmetro equivalente de partícula (µm)	Número de partículas no Al-NbC (% vol)			% de partículas no Al-NbC (%vol)		
		5	10	15	5	10	15
1	0,000-0,167	0	0	0	0	0	0
2	0,167-0,333	0	0	0	0	0	0
3	0,333-0,500	0	0	0	0	0	0
4	0,500-0,667	0	0	0	0	0	0
5	0,667-0,833	277	296	857	5,96	3,01	7,34
6	0,830-1,000	187	90	335	2,34	0,91	2,87
7	1,000-1,170	212	183	484	3,90	1,86	4,14
8	1,170-1,330	1069	1094	1703	13,36	11,12	14,58
9	1,330-1,500	1170	1408	1677	14,63	14,31	14,35
10	1,500-1,670	874	1077	1245	10,93	10,95	10,66
11	1,670-1,830	593	783	816	7,41	7,96	6,98
12	1,830-2,000	362	548	565	4,53	5,57	4,84
13	2,000-2,170	429	598	623	5,36	6,08	5,33
14	2,170-2,330	222	289	304	2,78	2,94	2,60

15	2,330-2,500	254	386	388	3,17	3,92	3,32
16	2,500-2,670	186	259	263	2,33	2,63	2,25
17	2,670-2,830	230	314	274	2,88	3,19	2,35
18	2,830-3,000	132	194	177	1,52	1,97	1,52
19	3,000-3,170	158	196	168	1,85	1,99	1,44
20	3,170-3,330	149	171	273	1,74	1,74	1,48
21	3,330-3,500	126	144	115	1,45	1,46	0,98
22	3,500-3,670	87	126	121	1,09	1,28	1,04
23	3,670-3,830	91	148	224	1,14	1,50	1,06
24	3,830-4,000	84	139	116	1,05	1,41	0,94
25	4,000-4,170	75	95	95	0,81	0,97	0,64
26	4,170-4,330	74	87	87	0,93	0,88	0,74
27	4,330-4,500	75	85	92	0,81	0,86	0,62
28	4,500-4,670	74	86	81	0,93	0,87	0,69
29	4,670-4,830	55	86	64	0,69	0,87	0,55
30	4,830-5,000	32	71	50	0,40	0,72	0,43
31	5,000-5,170	53	82	59	0,66	0,83	0,51
32	5,170-5,330	35	61	49	0,44	0,62	0,42
33	5,330-5,500	32	52	47	0,40	0,53	0,40
34	5,500-5,670	26	51	39	0,32	0,52	0,33
35	5,670-5,830	32	34	37	0,40	0,35	0,32
36	5,830-6,000	28	59	48	0,35	0,60	0,41
37	6,000-6,170	24	51	34	0,30	0,52	0,29
38	6,170-6,330	13	32	31	0,16	0,33	0,27
39	6,330-6,500	15	40	24	0,19	0,41	0,21
40	6,500-6,670	20	30	28	0,25	0,30	0,24
41	6,670-6,830	22	35	24	0,28	0,36	0,21
42	6,830-7,000	26	34	34	0,32	0,35	0,29
43	7,000-7,170	14	16	21	0,17	0,16	0,18
44	7,170-7,330	15	33	21	0,19	0,34	0,18
45	7,330-7,500	15	27	24	0,19	0,27	0,21
46	7,500-7,670	11	29	18	0,14	0,29	0,15
47	7,670-7,830	11	34	21	0,14	0,35	0,18
48	7,830-8,000	13	17	12	0,16	0,17	0,10
49	8,000-8,170	8	24	14	0,10	0,24	0,12
50	8,170-8,330	8	20	25	0,10	0,20	0,21
51	8,330-8,500	6	17	12	0,08	0,17	0,10
52	8,500-8,670	9	16	17	0,11	0,16	0,15
53	8,670-8,830	7	12	21	0,09	0,12	0,18
54	8,830-9,000	9	14	12	0,11	0,14	0,10
55	9,000-9,170	2	17	21	0,03	0,17	0,09

56	9,170-9,330	7	13	22	0,09	0,13	0,10
57	9,330-9,500	5	9	7	0,06	0,09	0,06
58	9,500-9,670	8	7	15	0,10	0,07	0,13
59	9,670-9,830	4	14	11	0,05	0,14	0,09
60	9,830-10,000	5	6	4	0,06	0,06	0,03
TOTAL		7760	9839	11949	100	100	100

Pode-se observar que para os três compósitos analisados, cerca de 56% das partículas individuais de NbC apresentam valores de diâmetro entre 1,7 e 2,7 μm , indicando que durante processamento não há alteração nas dimensões das partículas do reforço, quer seja por reações com a matriz, quer seja pelo trabalho mecânico de extrusão imposto ou ainda por reações entre si no caso do aumento de sua quantidade relativa no interior do compósito.

Os histogramas de distribuição de diâmetros de partículas NbC nos diferentes compósitos analisados evidenciam com mais clareza as afirmações acima e são apresentados na figura 4.13.

Os resultados estatísticos calculados a partir dos dados obtidos são os seguintes:

➤ Al-NbC 5% vol

- Número total de partículas contadas: 7760
- Valor médio do diâmetro de partícula calculado: 2,2 μm
- Desvio padrão: 1,47 μm
- Tolerância de confiança: 2%
- Diâmetro de máximo de partícula: 9,89 μm
- Diâmetro de mínimo de partícula: 0,74 μm

➤ Al-NbC 10% vol

- Número total de partículas contadas: 9849
- Valor médio do diâmetro de partícula calculado: 2,48 μm
- Desvio padrão: 1,65 μm

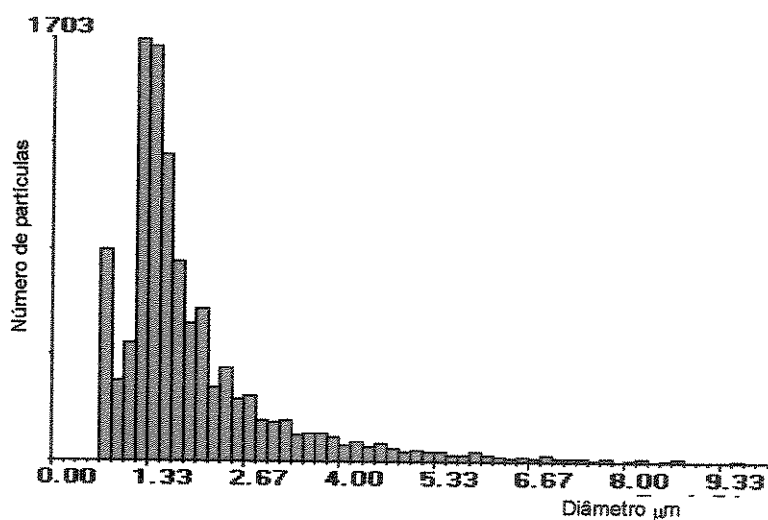
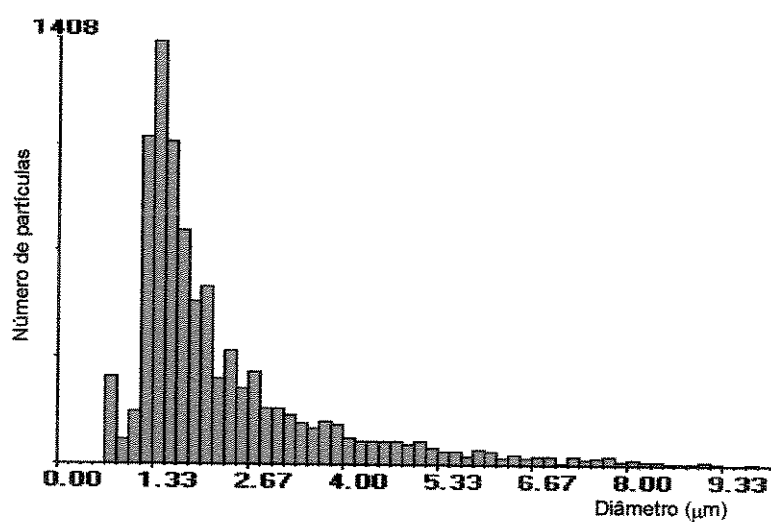
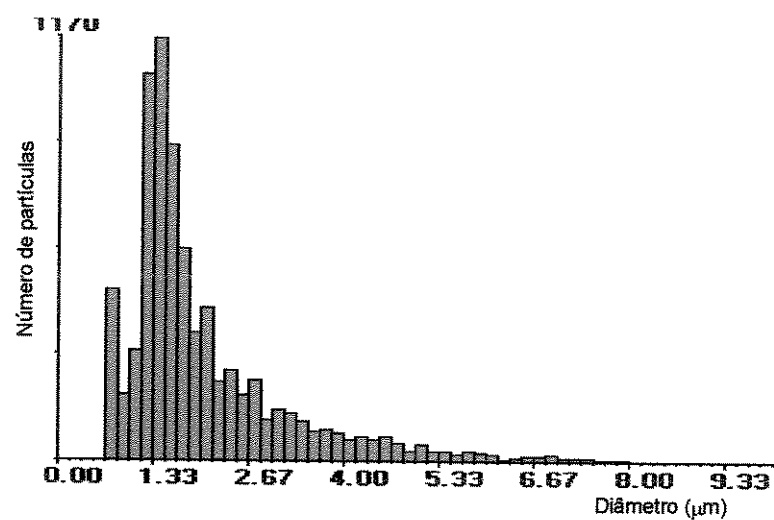


Figura 4.13 Distribuição de valores de diâmetros de partículas de reforço nos compósitos: a) Al-NbC (5% vol), b) Al-NbC (10% vol), c) Al-NbC (15% vol).

- Tolerância de confiança: 2%
- Diâmetro de máximo de partícula: 9,97 μm
- Diâmetro de mínimo de partícula: 0,74 μm

➤ Al-NbC 15% vol

- Número total de partículas contadas: 11947
- Valor médio do diâmetro de partícula calculado: 2,14 μm
- Desvio padrão : 1,51 μm
- Tolerância de confiança: 2%
- Diâmetro de máximo de partícula: 9,99 μm
- Diâmetro de mínimo de partícula: 0,74 μm

Observa-se que o diâmetro médio de partículas NbC, bem como seus valores máximo e mínimo são semelhantes para os três compósitos e também ao do pó NbC da matéria prima utilizada. Os resultados mostram também o aumento da quantidade de partículas presentes por área analisada, com o aumento do teor de reforço no compósito.

B) Distribuição Macroscópica das Partículas do Reforço

A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos quanto à contagem do número de partículas presentes por área analisada (com valor fixo de 0,38 mm^2) nos diferentes corpos de prova dos compósitos analisados.

Foram consideradas sempre as partículas como indivíduos isolados; os resultados, portanto, se prestam à análise da distribuição macroscópica da distribuição do reforço, uma vez que aglomerados de partículas entraram na contagem com o número de partículas individuais que contém. Dada a dimensão da área analisada (0,38 mm^2) e o número de áreas analisadas por compósito (30) os resultados podem refletir com certa segurança a distribuição macroscópica das partículas do reforço ao longo da seções e comprimento das barras produzidas.

Tabela 4.6- Contagem do número de partículas NbC por área de 0,38 mm² analisada, nos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol).

Número de partículas de NbC, nos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol)									
Medições	5%			10%			15%		
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3
M1	772	765	759	983	987	985	1197	1194	1194
M2	761	756	750	980	987	986	1192	1195	1195
M3	769	757	751	986	987	986	1194	1195	1195
M4	752	754	763	986	986	989	1192	1193	1193
M5	776	765	761	989	984	985	1195	1195	1197
M6	750	763	761	987	989	985	1193	1194	1195
M7	769	758	779	984	987	984	1195	1196	1194
M8	755	762	757	988	989	986	1194	1193	1193
M9	764	760	754	985	986	989	1195	1196	1194
M10	749	763	765	984	982	987	1195	1193	1192
Média	761,7 ±9,3	760,3 ±3,7	760,0 ±7,9	985,2 ±2,5	986,4 ±2,0	986,2 ±1,6	1194,2 ±1,5	1194,4 ± 1,1	1194,2 ±1,3

A figura 4.14 apresenta estes resultados graficamente.

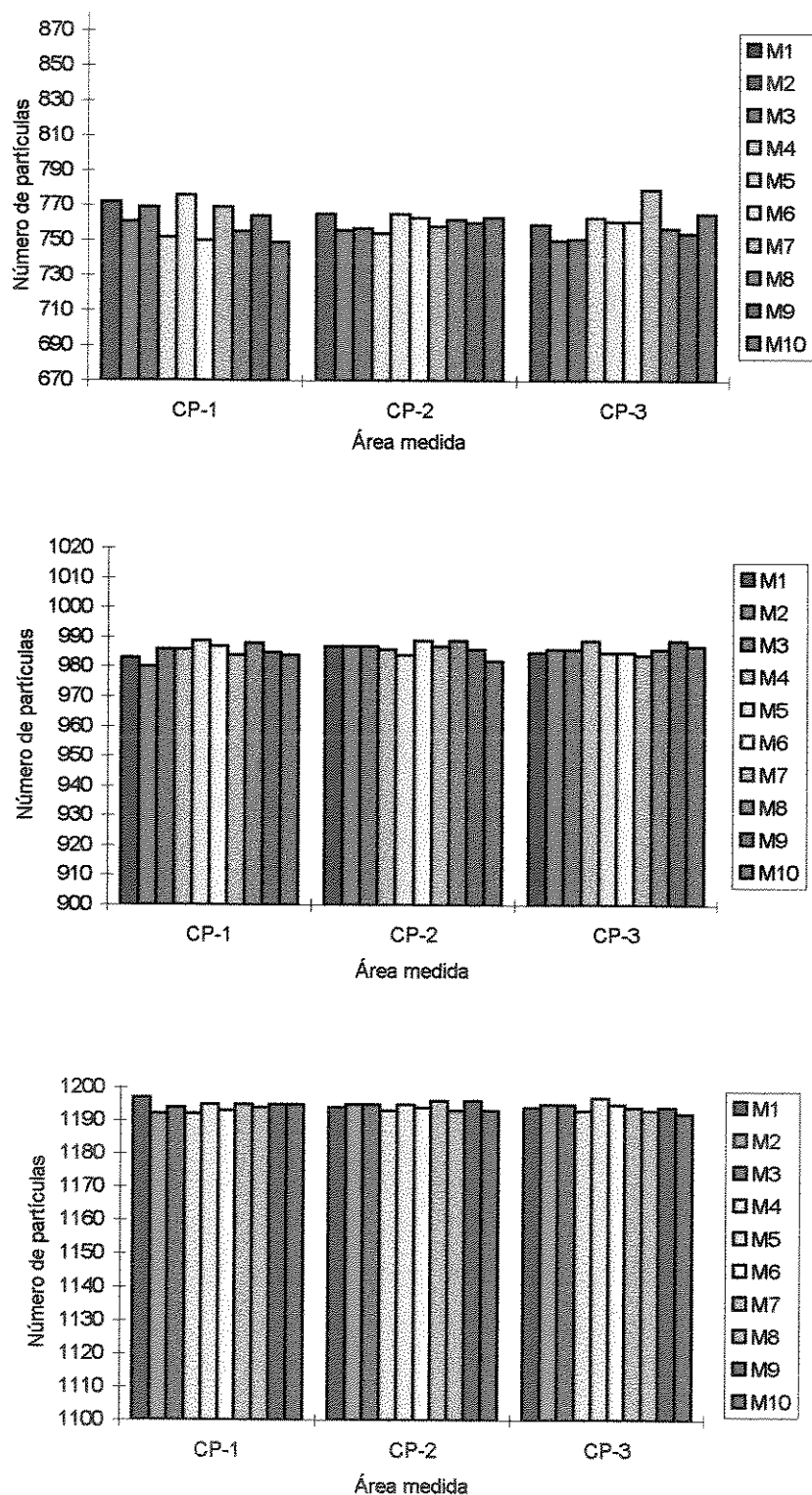


Figura 4.14. Distribuição do número de partículas do reforço nos compósitos: a) Al-NbC 5% vol; b) Al-NbC 10% vol; c) Al-NbC 15% vol

Pode-se observar que a quantidade de partículas NbC presentes nos compósitos pouco varia de região para região num mesmo corpo de prova e também se mostra bastante semelhante nos diferentes corpos de prova analisados.

Estes resultados demonstram uma boa distribuição do reforço nos compósitos produzidos, em termos macroscópicos. Não são esperadas áreas livres de partículas de extensão significativa como em geral ocorre em compósitos produzidos por outras técnicas populares como por exemplo infiltração, (CARVALHO, 1992; MORTENSEN, 1986).

A figura 4.15 apresenta o número médio de partículas NbC nos diferentes corpos de prova dos compósitos, para comparação. Observa-se o aumento do número de partículas com o aumento da fração volumétrica adicionada à matriz.

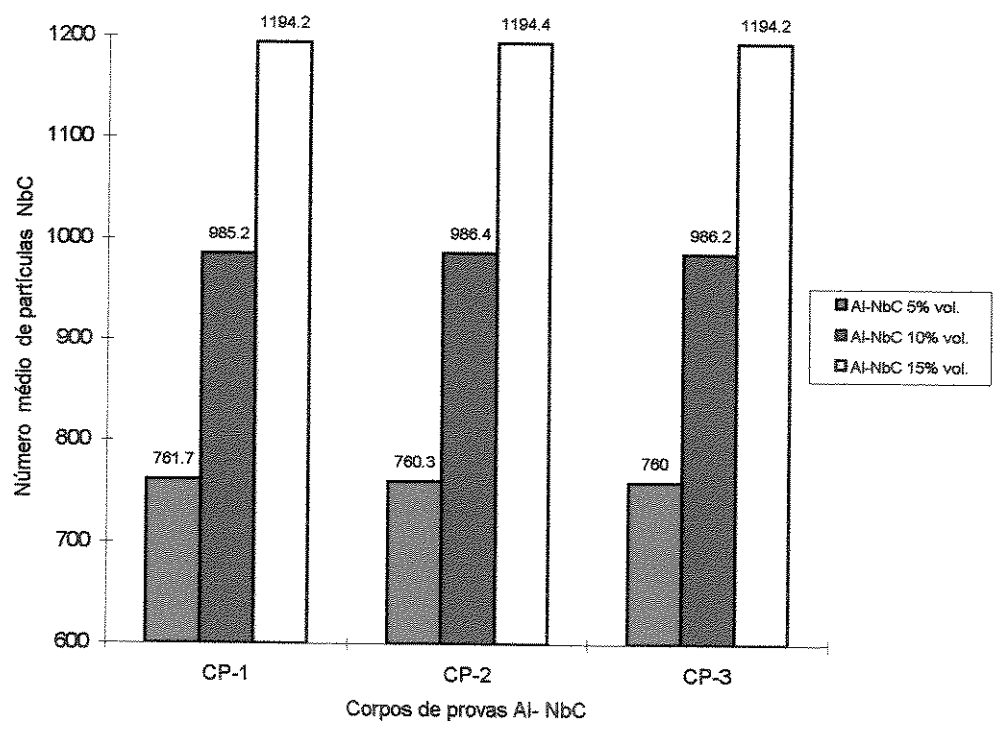


Figura 4.15- Comportamento das contagens de partículas de NbC para os diferentes compósitos Al-NbC (5%,10,15%vol).

Observa-se que o compósito contendo 10% vol NbC, apresenta nos três corpos de prova analisados incrementos de 30% no número de partículas, com respeito ao compósito contendo 5 % vol NbC; este acréscimo, no entanto, é de 20% quando se compara o compósito contendo 15% vol NbC e o de 10% vol NbC.

Este resultado indica a presença de partículas coalescidas dentro de agrupamentos, as quais não são identificadas como independentes pelo analisador de imagens. A distribuição microscópica das partículas do reforço merecem uma melhor análise, a qual é deixada aqui como sugestão para trabalhos posteriores.

Os resultados obtidos mostram, de maneira geral, homogeneidade na distribuição macroscópica das partículas do reforço, em todos os compósitos produzidos. Esta constatação permite o prosseguimento do trabalho, isto é, a caracterização mecânica e de propriedades físicas do material produzido.

4.2. Caracterização Mecânica dos Compósitos Al-NbC

Apresentam-se nos seguintes sub-itens os resultados dos diferentes ensaios feitos nos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol) e no Al extrudado, para sua caracterização em termos de comportamento à tração, dureza e desgaste.

4.2.1. Comportamento em Tração

Os resultados de ensaios de tração do Al e dos compósitos extrudados, são apresentados na tabela 4.7.

Foram analisados o limite de resistência (LR), o limite de escoamento (LE), o alongamento porcentual (A) e a estricção porcentual (Z) para ensaios à temperatura ambiente.

Os gráficos tensão x deformação obtidos durante ensaios são apresentados no Apêndice IV, enquanto o Apêndice V apresenta tabelas com os valores das propriedades para todos os corpos de prova ensaiados.

As figuras 4.16 a 4.20 apresentam os resultados obtidos em forma de gráficos relacionando as propriedades x teor de reforço no material.

Tabela 4.7- Resultados dos ensaios de tração nos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e no Al extrudado.

MATERIAL	LR (MPa)	LE (MPa)	A (%)	Z (%)
Al*	116 ±1	81±1	28 ±4	43 ±1
Al-NbC (5%)	141,00 ±0,09	118,00±0,57	27,00 ±2,52	29,00±1,22
Al-NbC (10%)	144,00 ±0,22	100,00±1,27	20,00 ±1,36	9,00±1,24
Al-NbC (15%)	147,00 ±0,06	99,00±1,20	16,00 ±0,58	4,00±1,28

* OBS.-Os ensaios de tração da barra extrudada sem reforço foram executados no IPEN-SP, por MORISCO (1995).

Quanto ao limite de resistência (LR), observa-se na tabela 4.7 e na figura 4.16, que os valores obtidos para os três compósitos são superiores aos obtidos para o Al e crescentes com o aumento do teor do reforço: no compósito com menor porcentagem de NbC (5% vol), o limite de resistência é 21% superior ao do Al; passando a 24% superior no caso do compósito contendo 10% vol NbC, e da ordem de 27% superior ao Al extrudado, para o compósito contendo 15% vol NbC.

Fazendo uma comparação entre os compósitos, o incremento do teor de NbC, de 5% vol para 10% vol, resulta em um aumento de 2% no valor do limite de resistência. Para porcentagens variando de reforço de 10% vol NbC para 15% vol NbC, um semelhante aumento do limite de resistência (da ordem de 3%) é observado. Pode-se concluir que na faixa de composição analisada, o

aumento de 5% vol do reforço NbC promove acréscimo da ordem de 2% a 3% no limite de resistência do compósito.

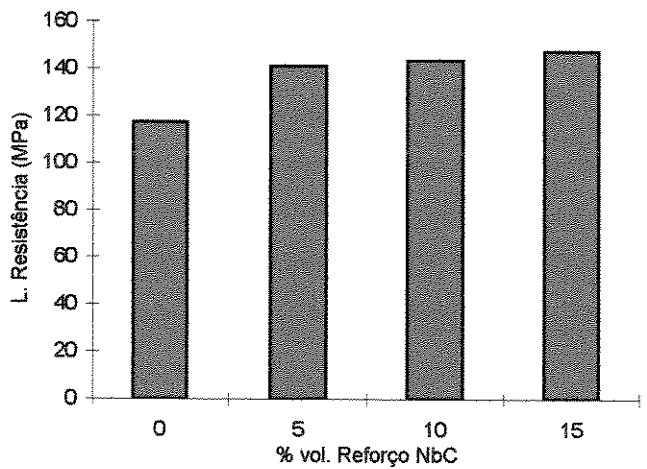


Figura 4.16- Variação do limite de resistência (LR) do Al e os compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.

O aumento do LR do Al pela incorporação do NbC e o aumento do LR nos compósitos com o aumento da fração volumétrica do reforço pode ser explicada pelo aumento das barreiras para movimentação de discordâncias (tanto por interações discordâncias-partícula de NbC, como interação entre discordâncias que se encontram com maior frequência); resultando em um aumento da tensão requerida para a deformação do material.

Quanto ao limite de escoamento para 0,2% de deformação (LE), a análise da tabela 4.7 e da figura 4.17 mostra que o valor desta propriedade é maior para os compósitos do que para o Al sem reforço, mas diminui com o incremento da porcentagem do reforço nos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol).

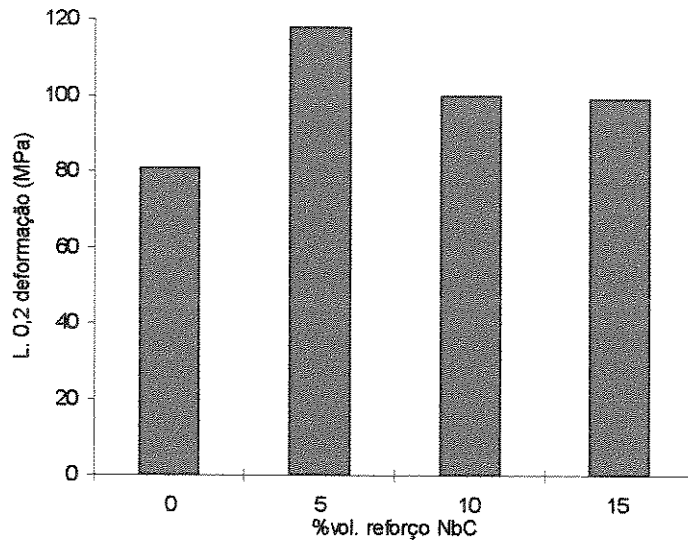


Figura 4.17- Variação do limite de escoamento (LE) a 0,2% de deformação (LE) do Al e compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.

Observa-se um aumento significativo, da ordem 46% no limite de escoamento do compósito contendo 5% vol de NbC, com relação ao limite de escoamento do Al utilizado como matriz, à temperatura ambiente. Registram-se acréscimos em LE da ordem de 23% e 22% para os compósitos de porcentagens (10% e 15% vol de NbC), respectivamente, quando comparados com o Al sem reforço.

Estabelecendo uma comparação entre os compósitos, observa-se um decréscimo do limite de escoamento (LE) com o aumento da quantidade de reforço (5% para 10%vol de NbC).

Pode-se explicar o aumento do LE com a adição de 5% NbC, com relação ao Al sem reforço, pelo fato das partículas duras servirem de barreira ao movimento de discordâncias, permitindo, no entanto, a deformação do material devido à baixa concentração de partículas (leia-se grande distância entre elas).

Com o aumento do teor de NbC, os campos de tensões em torno de partículas tornam-se mais próximos, prejudicando a deformação do material e reduzindo o LE.

MOURISCO (1995), observa efeito semelhante em compósitos Al-SiC (5, 10, 15% vol) com relação ao Al sem reforço.

ROSSI (1996), comenta que vários autores concordam em que o método convencional de determinação do limite de escoamento (0,2%) não é o mais adequado para se determinar o LE de materiais reforçados por partículas. Nestes materiais, a matriz dúctil é reforçada por partículas rígidas, causando altos gradientes locais de tensão na matriz em torno dos reforços. Como solução, ele assinala que pesquisadores da área sugerem que o método de análise das primeira, segunda e terceira diferenciais da curva tensão deformação, daria resultados mais próximos de um real limite de escoamento em materiais compósitos particulados. Isto se deve ao fato de que nestes tipos de materiais, ocorre na matriz taxas de encruamento superiores as observadas no material monolítico; esperando-se um escoamento plástico não homogêneo na matriz, começando em regiões de altas tensões próximas aos reforços.

Quanto ao alongamento porcentual (A), os resultados apresentados na tabela 4.7 e figura 4.18 mostram a redução do alongamento do material com aumento da porcentagem de reforço nos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol).

A adição de 5%vol de NbC ao Al não altera significativamente o valor do alongamento: este é reduzido em cerca de 4%, enquanto reduções de 28% e 43% são obtidas quando se aumenta a porcentagem de reforço em 10% e 15% vol NbC, respectivamente.

Quando são comparados os compósitos entre si, observa-se decréscimo de 26% no alongamento (A) do compósito contendo 5% vol do reforço em relação ao valor obtido para o compósito contendo 10% vol e decréscimo de 20% entre os compósitos contendo 10% para 15% vol NbC.

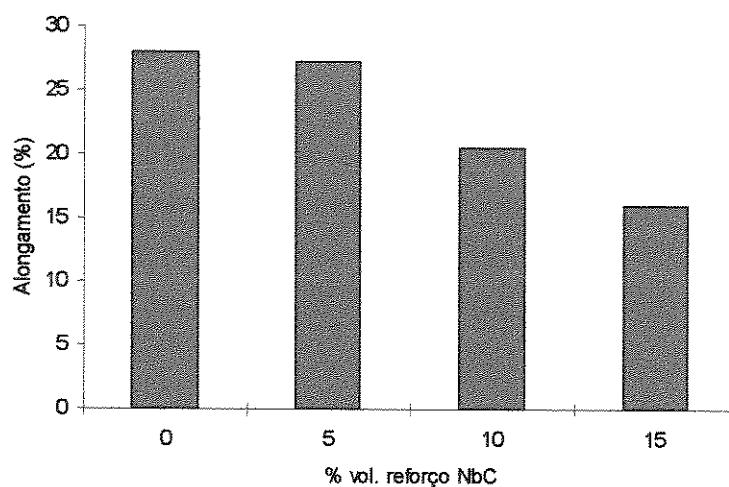


Figura 4.18-Variação alongamento percentual (A) do Al e compósitos Al-NbC, com o teor de NbC.

Os resultados mostram que à medida que aumenta a porcentagem do reforço é reduzida a capacidade de deformação do material, dado que as partículas duras de NbC funcionam como obstáculos às discordâncias, impedindo o seu movimento e dificultando a deformação da matriz; definindo as propriedades do compósito a combinação entre a rigidez do reforço e a ductilidade da matriz.

Quanto à estrição (Z), a análise da tabela 4.7 e figura 4.19, mostra acentuada redução no valor desta propriedade pela adição de partículas de NbC ao Al: redução de até 90% é obtida quando se compara o compósito contendo 15% vol NbC com o Al sem reforço.

A adição de 5% vol NbC ao Al já promove uma significativa (32%) redução na estrição com respeito ao Al; o aumento subsequente do teor de NbC leva a reduções mais significativas: o compósito comporta-se como material frágil, sem redução de área na seção de ruptura. As curvas tensão x deformação típicas para estes compósitos, apresentadas no Apêndice IV mostram claramente o fenômeno.

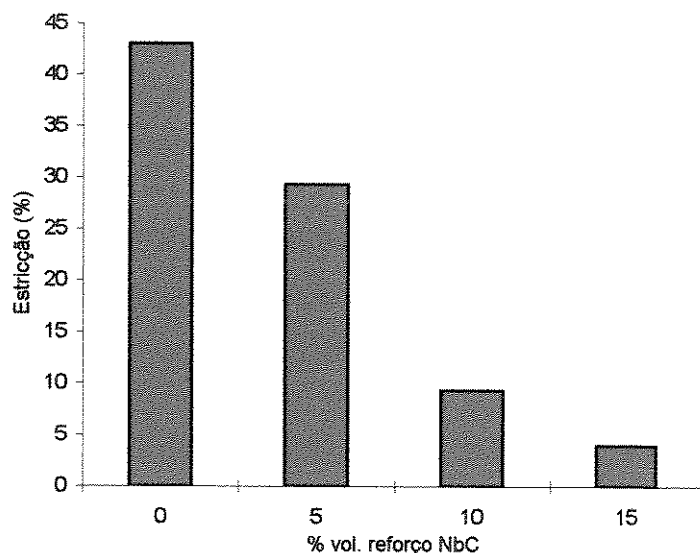


Figura 4.19-Variação da estrição percentual do Al e compósitos Al-NbC com teor de NbC.

Uma comparação entre os compósitos, resulta na observação de decréscimos na estrição (Z) de 70% e 55%, respectivamente, quando se aumenta o teor de reforço de 5 para 10% vol e de 10 para 15% vol NbC.

O decréscimo dos valores de redução de área na ruptura (Z), explica-se de maneira semelhante ao decréscimo no alongamento, isto é, pela redução da capacidade de deformação da matriz devido ao bloqueio ao movimento de discordâncias proporcionado pela presença das partículas duras do reforço NbC.

4.2.2. Considerações Sobre as Propriedades Mecânicas em Tração dos Compósitos Al-NbC.

Vários são os trabalhos buscando a correlação entre as propriedades mecânicas em tração de compósitos e suas características microestruturais; sendo, no entanto, como citado anteriormente, desconhecidos trabalhos relativos a compósitos Al-NbC.

Para os compósitos Al-NbC analisados, pode-se supor que não existem superfícies de separação prejudiciais entre as partículas do reforço e a matriz. A partícula de reforço está rodeada por uma matriz sólida formada pela sinterização das partículas de pó de Al, e o comportamento do compósito durante processamento deve ser basicamente dependente das dimensões e distribuição das partículas de reforço.

Pelas observações e análises microestruturais efetuadas, onde não se detectaram alterações nas partículas do reforço e ausência de fases indesejáveis foram verificadas, pode-se afirmar que as alterações medidas nas propriedades mecânicas em tração dos compósitos, com relação ao Al sem reforço, devem-se unicamente à própria presença das partículas NbC e sua influência em mecanismos de escorregamento da estrutura cristalina quando submetida ao esforço de tração.

Assim, o aumento das propriedades mecânicas dos compósitos Al-NbC, com respeito ao Al, é devida essencialmente à presença de partículas muito duras do reforço distribuídas na matriz, estas funcionam como obstáculos para a movimentação das discordâncias, impedindo o seu movimento e dificultando a deformação da matriz; a combinação entre rigidez do reforço e a ductilidade da matriz define as propriedades do compósito. Também pode-se dizer que os esforços durante a solicitação mecânica do compósito são transmitidos da matriz dúctil para o reforço e portanto, a presença destas partículas de alta dureza resultam no efeito de aumento das propriedades mecânicas do material.

De maneira geral observa-se que o aumento da quantidade de partículas de reforço tende a ocasionar aumento das propriedades mecânicas, mas simultaneamente confere ao compósito certa fragilidade.

ROBERT (1997), ao analisar o compósito Al-NbAl₃ também observa que o aumento excessivo da quantidade de reforço na matriz pode reduzir sua capacidade de deformação e fragilizar o compósito. O mesmo trabalho comenta que as propriedades de compósitos Al-NbAl₃ podem ser influenciadas pela variação no tamanho das partículas: reforços de menores dimensões tendem a

ser mais facilmente distribuídos na matriz, favorecendo as suas propriedades mecânicas. No caso de partículas de grandes dimensões, estas podem gerar fontes de defeitos, já que funcionam como descontinuidade da matriz, reduzindo sua capacidade de deformação.

Nos compósitos analisados neste trabalho as partículas de reforço empregadas apresentam fina granulometria às quais, como observado, apresentam-se com boa distribuição na macroestrutura do compósito.

No entanto, aglomeração de partículas do reforço podem ser observadas, principalmente nos compósitos de maior fração volumétrica de NbC.

Estas aglomerações formam uma partícula granulada grande e frágil, portanto reduzindo a rigidez do reforço e como consequência as propriedades mecânicas do compósito. Provavelmente a sua ausência levaria a melhores resultados para o compósito Al-NbC (15%vol).

Tabela 4.8-Comparação das propriedades mecânicas de compósitos extrudados Al-NbC e Al-SiC*.

MATERIAIS EXTRUDADOS	LR (MPa)	LE (MPa)	A (%)	Z (%)
Al	116±1	81±1	28±4	43±1
Al-SiC 5% vol	128±1	86±2	26±1	23±1
Al-NbC 5% vol	141,00±0,09	118,00±0,57	27,00±2,52	29,00±1,22
Al-SiC 10% vol	137±2	88±2	22±3	16±3
Al-NbC 10% vol	144,00±0,22	100,00±1,27	20,00±1,36	9,00±1,24
Al-SiC 15% vol	145±3	92±3	15±1	10±2
Al-NbC 15% vol	147,00±0,06	99,00±1,20	16,00±0,58	4,00±1,28

* Resultados de MOURISCO (1995).

De maneira geral, no entanto, os compósitos Al-NbC analisados apresentaram interessantes propriedades mecânicas. Para efeito de comparação, a tabela 4.8 apresenta as propriedades em tração de compósitos Al-SiC, largamente estudados e de aplicação corrente, e dos compósitos Al-NbC estudados neste trabalho.

Ambos os grupos foram produzidos e analisados seguindo as mesmas técnicas. (Resultados dos compósitos Al-SiC devidos a MOURISCO,1995)

Pode-se observar que quanto ao LR e LE, os compósitos Al-NbC apresentam superior comportamento, apresentando elevado valor de LR já para 5% vol do reforço e tendo superiores valores de LE para os compósitos contendo 10 e 15% vol de NbC, quando comparados com os mesmos teores de SiC no compósito equivalente.

Quanto ao A, os comportamentos dos compósitos Al-SiC e Al-NbC são bastante similares; no entanto os valores de Z são mais drasticamente reduzidos para teores de 10 e 15% vol de NbC do que para as mesmas frações de SiC como reforço.

Naturalmente estes resultados não podem ser tomados fora de um contexto de análise da microestrutura de cada tipo de compósito (SiC e NbC apresentam diferentes propriedades físicas inerentes, diferentes dimensões de partículas, etc.).

Os resultados, no entanto, são altamente indicativos das excelentes perspectivas para os compósitos Al-NbC.

4.2.3. Resistência ao Desgaste

Na caracterização da resistência ao desgaste nos compósitos, utilizou-se testes de desgaste do tipo abrasivo, nomeado pino-sobre-disco, onde os corpos de provas do Al e dos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol), sob efeito de uma determinada carga, são deslizados sobre superfícies abrasivas constituídas de lixas de diferentes granulometrias.

Os resultados gerais dos ensaios de desgaste realizados para o Al e os compósitos são apresentados a seguir, e os valores das medições feitas encontram-se no Apêndice VI.

A) Al sem Reforço

A tabela 4.9 apresenta resultados dos valores médios dos parâmetros de desgaste do Al. Analisou-se a variação da massa (Δm) em função do percurso para as diferentes condições do ensaio, utilizando-se duas superfícies abrasivas diferentes (lixa com grana 220 e 320) e duas cargas diferentes (300g e 506g).

Tabela 4.9- Valores médios da variação da massa (Δm) do Al em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.

PERCURSO (metros)	VARIAÇÃO DE MASSA (Δm) g			
	Condição 1 Lixa 220/ carga 300g	Condição 2 Lixa 320/ carga 300g	Condição 3 Lixa 220/ carga 506g	Condição 4 Lixa 320/ carga 506g
0	0	0	0	0
90	0,0993	0,0440	0,1567	0,0702
180	0,2163	0,0916	0,3057	0,1545
270	0,3025	0,1379	0,4540	0,2162
360	0,3867	0,1793	0,5890	0,2617
450	0,4693	0,2135	0,7202	0,2965

* precisão de medida: $\pm 0,0001$ g

Para melhor visualização, os resultados são apresentados graficamente na figura 4.20.

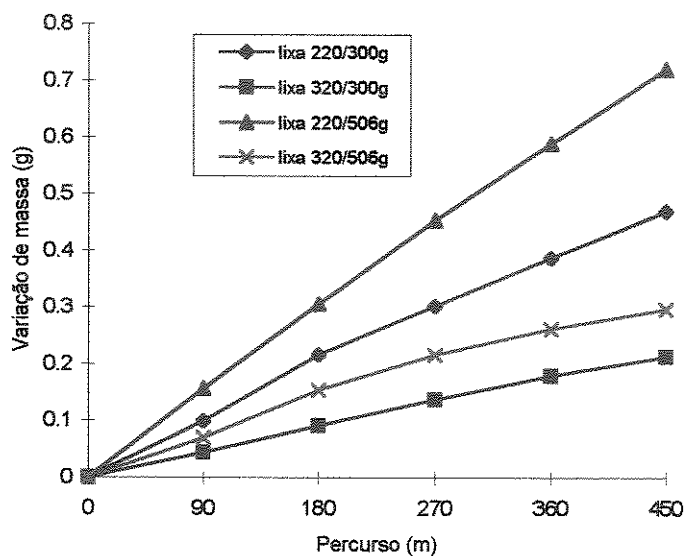


Figura 4.20 - Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do Al, em função do percurso.

Pode ser observado que para os valores de percurso utilizados há sensível desgaste do material para todas as condições analisadas.

A condição mais crítica de desgaste foi obtida para a lixa de granulometria mais grosseira e a maior carga, naturalmente as condições mais severas de ensaio. Observa-se que a influência da superfície abrasiva é maior do que a da carga utilizada: a diferença entre as perdas de massa com a variação de lixas é maior do que com a variação de cargas para uma mesma lixa, indicando a elevada ductilidade do material testado.

Observa-se ainda o comportamento aproximadamente linear do aumento da perda de massa com o aumento do percurso do ensaio, para todas as condições.

B) Compósito Al-NbC (5%vol)

A tabela 4.10 apresenta os resultados dos valores médios dos parâmetros de desgaste do compósito Al-NbC (5% vol), nas diferentes condições analisadas.

Tabela 4.10 - Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC (5% vol) em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.

PERCURSO (metros)	VARIAÇÃO DE MASSA (Δm) g			
	Condição 1 Lixa 220/ carga 300g	Condição 2 Lixa 320/ carga 300g	Condição 3 Lixa 220/ carga 506g	Condição 4 Lixa 320/ carga 506g
0	0	0	0	0
90	0,0723	0,0385	0,1227	0,0798
180	0,1375	0,0800	0,2413	0,1602
270	0,1957	0,1223	0,3483	0,2297
360	0,2523	0,1628	0,4443	0,2925
450	0,3058	0,1972	0,5418	0,3440

* precisão de medida: 0,0001 g

Estes resultados são apresentados graficamente na figura 4.21.

Também neste caso, à semelhança do que ocorre com o Al, as condições de ensaio foram suficientes para promover sensível desgaste nas amostras do compósito.

Novamente a condição de maior desgaste é obtida no ensaio com a superfície abrasiva mais grosseira e a maior carga (condição 3) e, em oposição, o menor desgaste obtido na condição de ensaio menos severa (condição 2 - lixa mais fina e menor carga).

Também neste caso o aumento da variação da massa do corpo de prova é aproximadamente linear com o aumento do percurso de ensaio, em todas as condições.

De maneira geral, pode-se observar valores de perda de massa inferiores aos obtidos para o Al sem reforço, para a maioria das condições analisadas, exceto para a condição 4 (lixa mais fina e maior carga) onde os resultados obtidos são semelhantes aos obtidos para o Al.

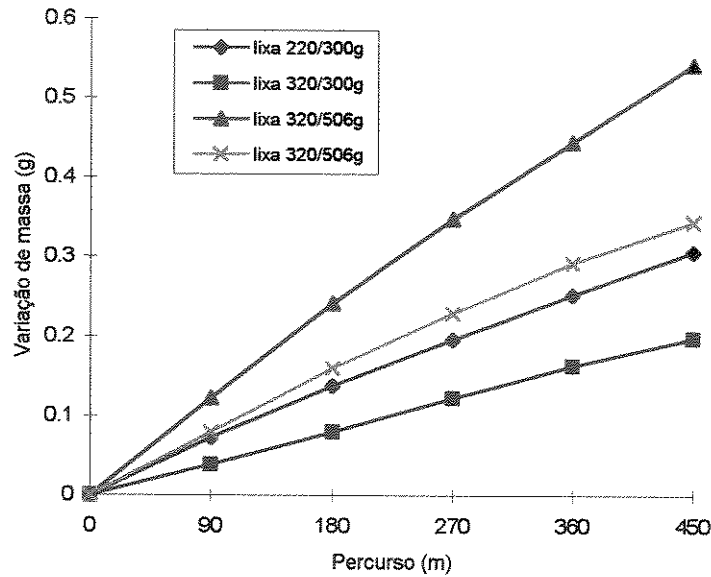


Figura 4.21-Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do composto Al-NbC (5%vol), em função do percurso.

Na condição mais severa de ensaio, o composto Al-NbC (5% vol) apresenta perda de massa da ordem de 25% inferior à apresentada pelo Al sem reforço ensaiado nas mesmas condições, para o máximo percurso.

Uma análise dos resultados apresentados mostra ainda que a influência da carga aplicada no ensaio é mais significativa para o composto do que para o Al sem reforço, indicando a menor ductilidade do material.

Os resultados superiores obtidos pelo composto em relação ao Al sem reforço são devidos à presença das finas partículas do reforço NbC. Segundo ALPAS (1994), em trabalhos com compostos Al-SiC, partículas de reforço de diâmetros da ordem de 1 a 2 μm atuam como protetores da matriz dúctil em ensaios de desgaste, melhorando seu comportamento em abrasão pela redução de perda de massa.

C) Compósito Al-NbC (10% vol)

A tabela 4.11 apresenta os resultados correspondentes aos valores médios dos parâmetros de desgaste medidos (Δm) em função do percurso, do compósito Al-NbC (10% vol), para as diferentes condições de ensaio.

Tabela 4.11 -Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC (10% vol) em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.

PERCURSO (metros)	VARIAÇÃO DE MASSA (Δm) g			
	Condição 1 Lixa 220/ carga 300g	Condição 2 Lixa 320/ carga 300g	Condição 3 Lixa 220/ carga 506g	Condição 4 Lixa 320/ carga 506g
0	0	0	0	0
90	0,0622	0,0335	0,1063	0,0642
180	0,1027	0,0438	0,1743	0,1008
270	0,1267	0,0478	0,2370	0,1242
360	0,1450	0,0505	0,2773	0,1347
450	0,1593	0,0522	0,2935	0,1442

* precisão de medida: 0,0001 g

Estes resultados são apresentados graficamente na figura 4.22.

Observa-se neste caso que a variação de massa aumenta de maneira não linear ao transcurso do ensaio, isto é, com o aumento do percurso.

Este compósito apresenta valores inferiores de perda de massa aos obtidos para o Al sem reforço e para o compósito contendo 5% vol NbC, em todas as condições de ensaios.

Na condição mais severa de ensaio e para o máximo percurso, o compósito Al-NbC (10% vol) apresenta perda de massa da ordem de 45% inferior à apresentada pelo Al-NbC (5% vol) e de 60% inferior à apresentada pelo Al, ensaiado nas mesmas condições.

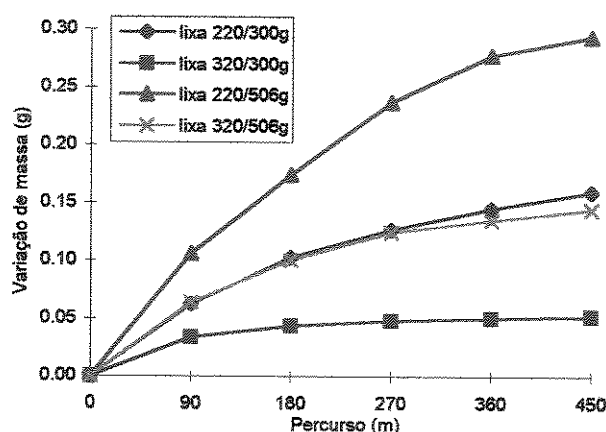


Figura 4.22-Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do compósito Al-NbC (10% vol), em função do percurso.

Observe-se ainda que para as condições intermediárias de ensaio, os valores de perda de massa com o percurso são semelhantes; indica-se portanto, para melhor análise do comportamento ao desgaste do material, a não utilização destas condições de teste.

Os resultados superiores obtidos pelo compósito Al-NbC (10% vol), são devidos ao aumento da porcentagem de reforço com respeito ao Al-NbC (5% vol); as finas partículas do reforço funcionam portanto, no aspecto global, como protetores da matriz ao seu amassamento ou arrancamento.

D) Compósito Al-NbC (15% vol)

A tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de desgaste do compósito Al-NbC 15%.

Tabela 4.12 - Valores médios da variação da massa (Δm) do compósito Al-NbC 15% vol em função do percurso, para quatro condições diferentes de ensaios.

PERCURSO (metros)	VARIAÇÃO DE MASSA (Δm) g			
	Condição 1 Lixa 220/ carga 300g	Condição 2 Lixa 320/ carga 300g	Condição 3 Lixa 220/ carga 506g	Condição 4 Lixa 320/ carga 506g
0	0	0	0	0
90	0,0378	0,0222	0,0860	0,0457
180	0,0818	0,0277	0,1217	0,0755
270	0,0940	0,0322	0,1395	0,0835
360	0,1013	0,0351	0,1507	0,0873
450	0,1047	0,0371	0,1588	0,0915

* precisão da medida: 0,0001 g

Estes resultados são apresentados graficamente na figura 4.23.

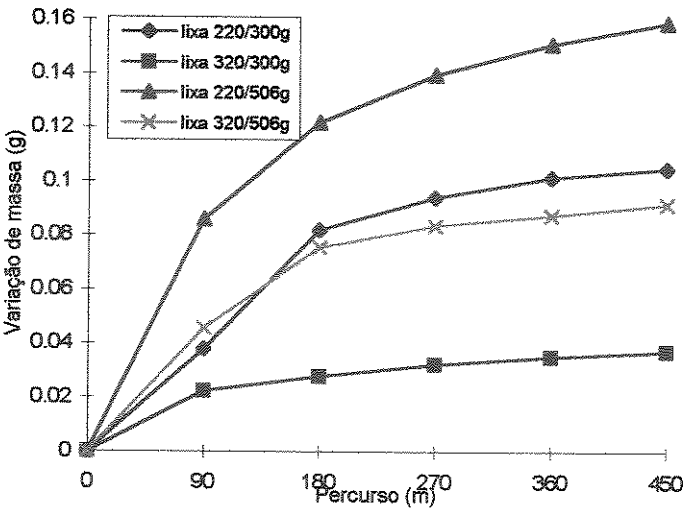


Figura 4.23-Variação da massa (Δm) para quatro condições diferentes de ensaio de desgaste do compósito Al-NbC (15% vol), em função do percurso.

Neste caso, o comportamento não linear do aumento da variação de massa com o aumento do percurso, no transcurso do ensaio, é mais claramente observado.

Os valores de perda de massa neste compósito são ainda inferiores aos obtidos para o compósito Al-NbC (10% vol), para todas as condições.

No caso da condição mais severa de ensaio, o compósito contendo 15% de NbC apresenta perda de massa da ordem de 80% inferior à apresentada pelo Al ensaiado nas mesmas condições.

Novamente se observa que as condições de ensaios intermediárias (lixa fina + carga elevada e lixa grossa e reduzida carga) fornecem resultados semelhantes quanto à perda de massa; este resultados mostram a forte influência da superfície abrasiva no comportamento do material em desgaste.

E) Comparação dos Comportamentos ao Desgaste do Al e dos Compósitos Al-NbC (5,10,15% vol)

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de desgaste, de maneira comparativa entre os diferentes materiais testados, por condição de teste.

A figura 4.24 apresenta os resultados obtidos para a condição 1, isto é, superfície abrasiva de lixa 220 e carga aplicada 300g.

Pode-se observar que para percursos pequenos já há diferenciação na perda de massa dos materiais. Esta perda aumenta com o aumento do percurso; este aumento é mais acentuado à medida que o teor de reforço diminui.

Para os compósitos contendo 15% vol do reforço, a perda de massa das amostras pouco varia após 180 m de percurso. Este resultado pode indicar o encruamento da matriz devido à grande quantidade de partículas presentes; também podem indicar que as eventuais aglomerações de partículas de compósitos não interferem de maneira significativa no comportamento ao

desgaste. No caso de grandes quantidades de aglomerados, sua presença poderia aumentar o desgaste do material, por fenômenos de arrancamento, o que certamente provocaria aumento na perda de massa dos compósitos.

A figura 4.25 apresenta os resultados obtidos para a condição 2, ou seja, superfície abrasiva de lixa 320 e carga de 300g. Esta condição é a menos severa entre todas, observa-se como a perda é menor que na condição anterior.

Mostra-se também que para percursos pequenos há pouca diferenciação da perda de massa dos diferentes materiais. Nos materiais com 0 e 5% vol NbC, observa-se um comportamento similar, devido ao pouco conteúdo do reforço, com perda de massa de maneira aproximadamente linear com o aumento do percurso.

Para esta condição, os compósitos contendo 10 e 15% vol NbC também apresentam comportamento similar, com pouca variação de massa no transcorrer do ensaio.

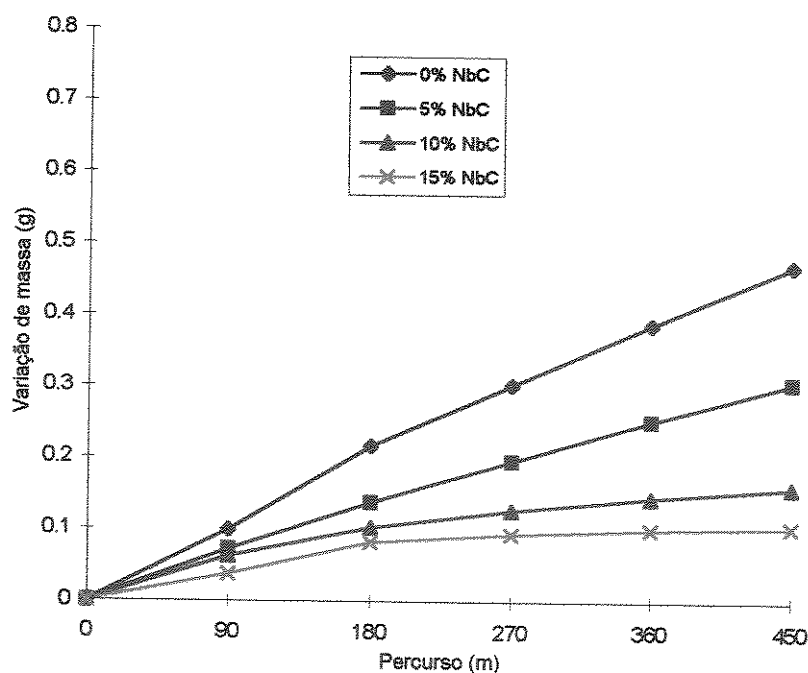


Figura 4.24- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 220-carga 300g.

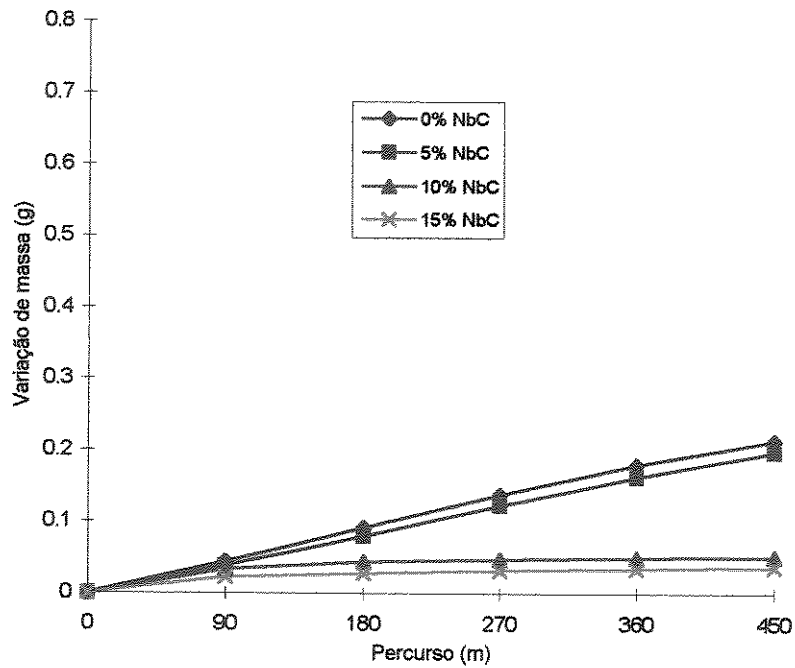


Figura 4.25- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 320-carga 300g.

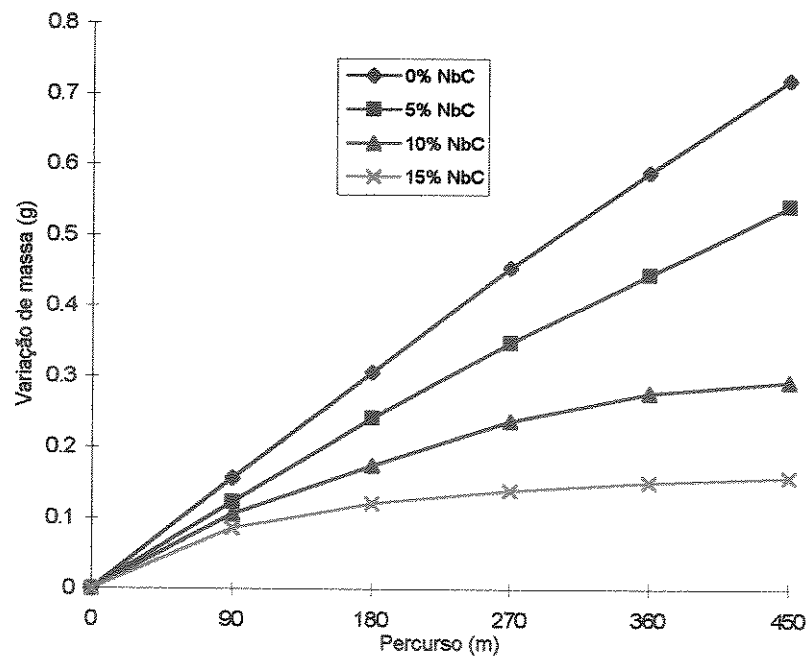


Figura 4.26- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 220-carga 506g.

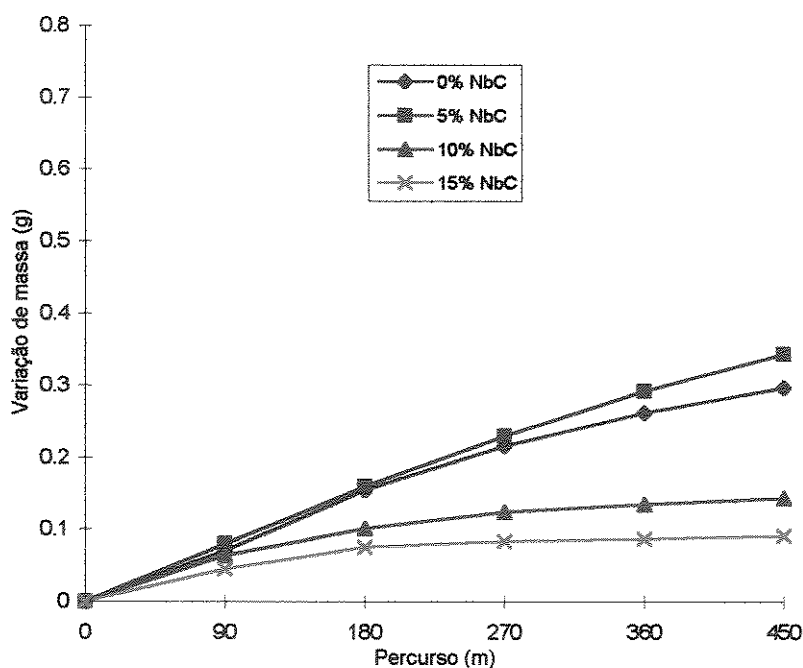


Figura 4.27- Variação da massa (Δm) em função do percurso, para os diferentes materiais analisados. Condição de ensaio: lixa 320-carga 506g.

A figura 4.26 apresenta os valores de perda de massa mais elevados em comparação com a obtida para as outras condições, isto é, trata-se da condição mais severa de ensaio: superfície abrasiva de lixa 220 e carga aplicada 506g.

Aqui também o compósito com maior porcentagem de reforço (15% vol NbC), apresenta menores valores de perda de massa e pouco varia após 180m de percurso, como nas condições de ensaio precedentes.

Para a figura 4.27 observa-se que os valores de perda de massa do compósito com 5% vol NbC e do Al são similares e até manifestou-se mais perdas no compósito. Esta diferença pode ser considerada um resultado atípico, porque nas demais condições de ensaio não se manifestou este fenômeno.

F) Análise do Desgaste pelo Coeficiente de Desgaste

Para uma melhor avaliação do efeito geral de resistência ao desgaste dos compósitos Al-NbC (5,10,15%), apresenta-se um análise do coeficiente de

desgaste (*W*), segundo cálculos feitos utilizando a equação já apresentada no Capítulo 3:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho A_0 L}$$

Este coeficiente relaciona a perda de massa (Δm) com a densidade do material (ρ), área da seção do corpo de prova (A_0) distância percorrida (L). Foram utilizados os valores de perda de massa obtidos para o máximo percurso.

A tabela 4.13 apresenta os valores de *W* obtidos, os quais são apresentados graficamente na figura 4.28.

Tabela 4.13-Valores médios do coeficiente de desgaste (*W*) dos compósitos Al-NbC (5,10,15% vol) e do Al, para quatro condições diferentes de ensaios.

MATERIAL (% vol)	COEFICIENTE DE DESGASTE (<i>W</i>)x10 ⁻⁶			
	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
	Lixa 220/ carga 300g	Lixa 320/ carga 300g	Lixa 220/ carga 506g	Lixa 320/ carga 506g
Al	2,88±0,01	1,36±0,01	4,59±0,01	2,13±0,03
Al-NbC (5%)	1,49±0,02	1,23±0,03	3,56±0,02	1,89±0,02
Al-NbC (10%)	0,98±0,01	0,33±0,01	1,84±0,03	0,89±0,02
Al-NbC (15%)	0,62±0,01	0,21±0,03	0,93±0,01	0,54±0,01

Observa-se, em primeiro lugar, os superiores valores de *W* para o Al sem reforço, para todas as condições analisadas. O aumento do teor de reforço no compósito leva à redução de *W* para todas as condições de ensaio (aqui desconsiderado o valor atípico apresentado pelo compósito Al-NbC 5% vol quando ensaiado com lixa 320 e carga 506g. A curva com maior gradiente é obtida para a condição de máxima severidade de ensaio (lixa 220/carga 506g), enquanto na condição menos severa (lixa 320/carga300g) os resultados não conseguem diferenciar os comportamentos do Al sem reforço e do compósito Al-NbC (5%vol) e também dos compósitos 10 e 15% vol NbC entre si.

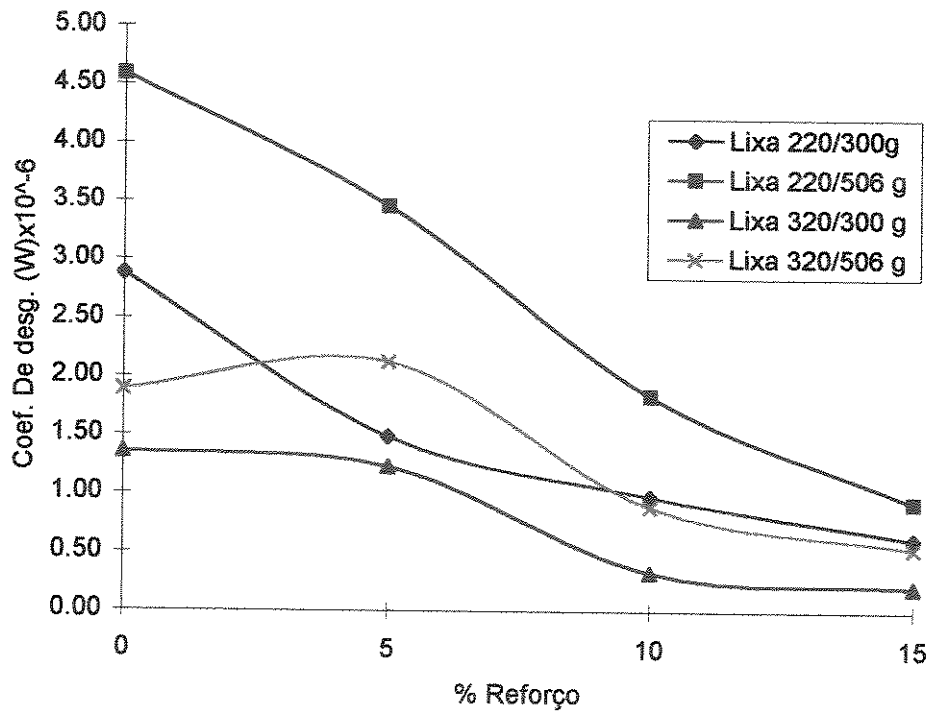


Figura 4.28-Comportamento do coeficiente de desgaste (W), nos diferentes materiais ensaiados, em função da porcentagem de reforço, para quatro condições analisadas.

Para a condição 1 (lixa 220/320g) existe uma redução de W , com respeito ao Al de 48% para o compósito (Al-NbC 5% vol), incrementando-se estes valores de redução de W , para os compósitos de (10 e 15% vol) de reforço, em 66% e 78%, respectivamente.

Na condição 2 (lixa 320/300g), o coeficiente de desgaste também é reduzido para os compósitos Al-NbC, obtendo-se reduções de 10%, 76% e 84%, para as porcentagem (5,10 e 15% vol), respectivamente.

Já na condição 3 (lixa 220/506g), a de maior intensidade no desgaste, observa-se reduções de 22%, 60% e 80% no W do Al pela introdução de 5, 10,15% vol NbC, respectivamente.

Na condição 4 (lixa 320/506g), os resultados mostram reduções do W nos compósitos, da ordem de 11%, 58% e 74% para as porcentagem de reforço (5,10, 15% vol de NbC), respectivamente.

A presença de partículas de NbC como reforço do Al tem, portanto, significativa influência no seu comportamento à abrasão: reduções da ordem de 80% no coeficiente de desgaste, associados às boas propriedades mecânicas já observadas, podem tornar os compósitos Al-NbC potencialmente interessantes para uso em engenharia.

G) Observação da Superfície de Desgaste

A figura 4.29 apresenta três superfícies dos corpos de prova de desgaste, dos diferentes compósitos, testados na condição de carga 300g e lixa 220. Pretende-se identificar os mecanismos de desgaste abrasivo presentes nestes materiais.

Pode-se observar, de modo geral, ranhuras e deformação plástica na matriz. Observe-se que para os compósitos com maior quantidade de reforço as ranhuras são de pouca profundidade e o material da matriz conserva-se mais liso (menos deformação plástica) nos compósitos de menor teor de reforço; demonstrando assim que o desgaste é menos intensivo à medida que a porcentagem do reforço é aumentada.

Da análise das superfícies apresentadas, pode-se sugerir que, dentro os mecanismos de desgaste abrasivo apresentados no Apêndice II, estão presentes no caso dos compósitos Al-NbC dois mecanismos fundamentais:

- a) formação de ranhuras por deformação plástica
- b) formação de ranhuras por microusinagem da superfície de menor dureza, pela partícula abrasiva.

O primeiro tem presença marcante no compósito contendo menor teor de reforço, onde elevada deformação plástica pode ser observada. O aumento do teor de reforço reduz a deformação da matriz, incentivando o segundo mecanismo.

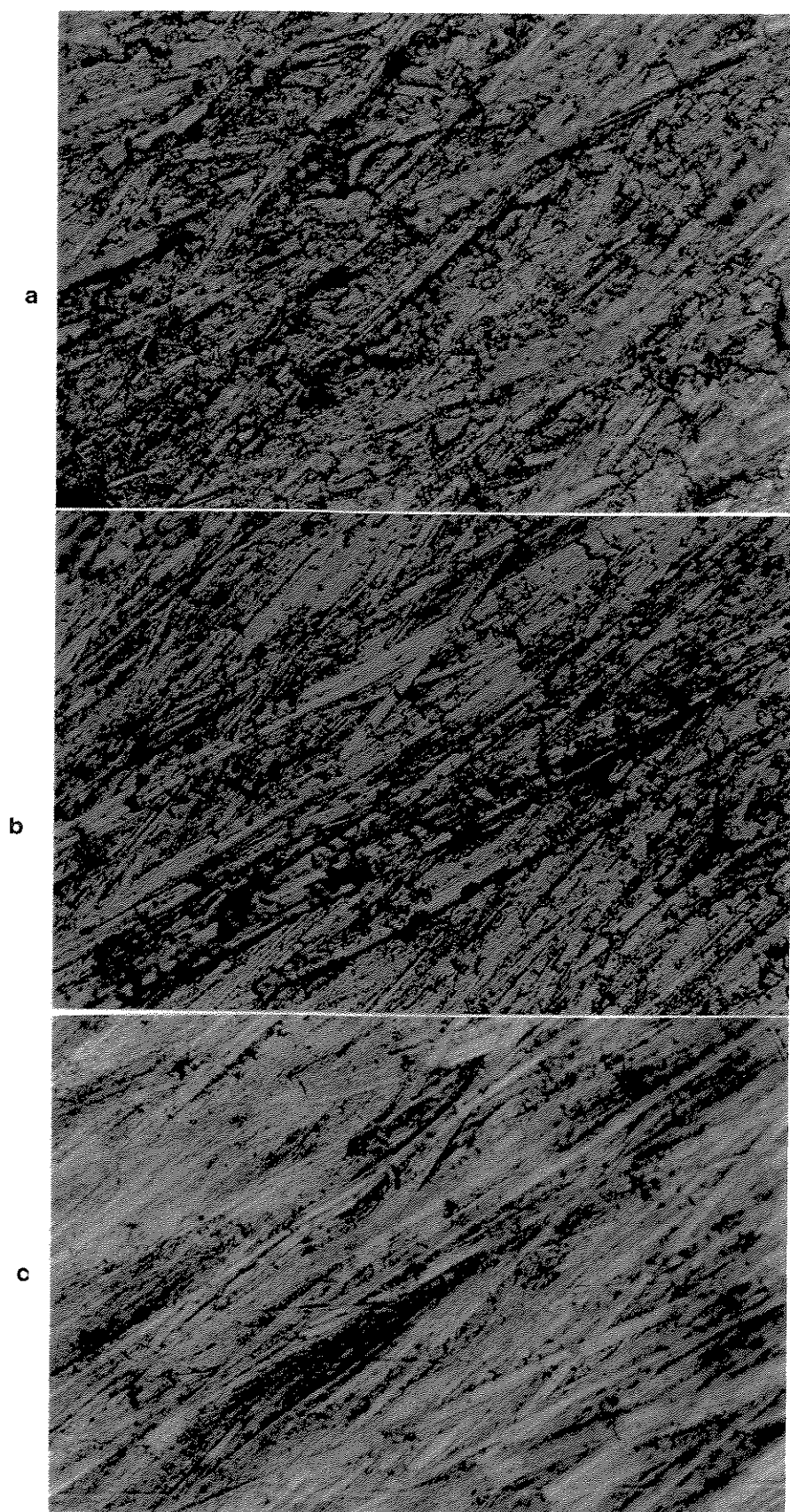


Figura 4.29-Fotografias das superfícies de desgaste dos diferentes compósitos. Na condição carga 300g e lixa 220.
a) Al-NbC 5% b) Al-NbC 10% c) Al-NbC 15%

4.2.4. Dureza

A) Microdureza

Os valores das medidas de microdureza obtidos para as duas fases presentes nos compósitos produzidos (Al- α e NbC) são apresentados no Apêndice VII. A tabela 4.14 apresenta o valor médio obtido para a matriz de Al e o valor máximo medido (em 10 medições) para o reforço NbC.

Tabela 4.14-Valores de microdureza (*Vickers*) da matriz e do reforço nos compósitos Al-NbC produzidos.

FASE	HV
Matriz (Al)	34,1 $\pm$ 1,0 *
Reforço (NbC)	1860,3 **

* valor médio de 10 medidas

** valor máximo medido

Levando em conta a reduzida dimensão das partículas do reforço em relação à dimensão da impressão para medida de microdureza, foram escolhidas as maiores partículas de NbC ou mesmo aglomerados de partículas, para a medida desta característica; além disso foi tomado como valor da dureza o máximo valor encontrado e não a média de várias medidas.

Acredita-se que com este procedimento um valor bem aproximado do real valor de dureza do NbC seja obtido.

Uma comparação quantitativa entre as durezas dos dois diferentes constituintes dos compósitos pode ser vista na figura 4.30. Observa-se que a matriz possui apenas cerca de 2% da dureza do reforço.

Espera-se, portanto, que a adição do reforço NbC tenha influência significativa na dureza do Al.

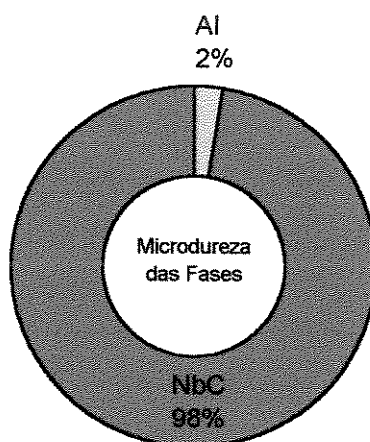


Figura 4.30- Comparação entre as microdurezas da matriz de Al e do reforço NbC.

B) Macro dureza

Na macro dureza contempla-se o compósito como um material monolítico e o resultado será a combinação entre dureza da matriz de Al e do reforço NbC, dependendo sempre da quantidade adicionada de reforço na matriz. Os resultados obtidos em todas as medidas são apresentados também no Apêndice VII, sendo os valores médios das medidas para cada tipo de material, são apresentados na tabela 4.15.

Tabela 4.15-Valores de macro dureza dos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol) e do Al sem reforço.

MATERIAIS	Dureza <i>Brinell</i> HB
Al	29,89±0,43
Al-NbC (5% vol)	35,49±0,52
Al-NbC (10% vol)	38,66±0,37
Al-NbC 15%	42,01±0,18

Estes resultados são apresentados graficamente na figura 4.31.

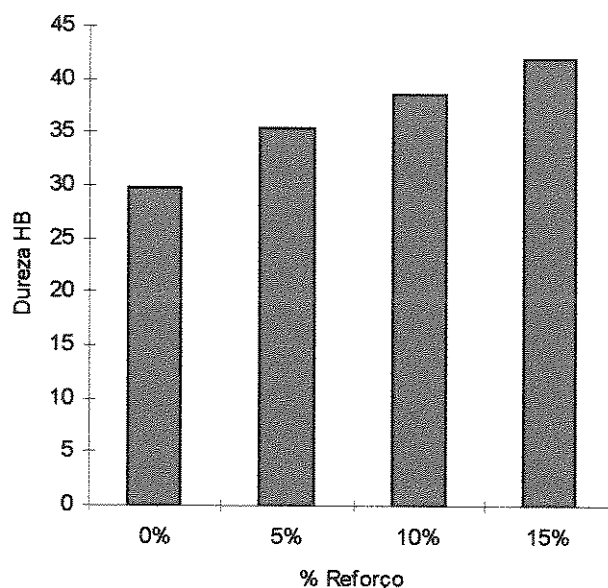


Figura 4.31-Comportamento da dureza (HB) dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e do AL.

Observa-se na figura 4.31 que a medida que aumenta a quantidade de reforço aumenta a dureza dos compósitos, alcançando valores de incrementos de 19%, 29% e 40% para os compósitos contendo 5,10, 15% vol NbC, respectivamente, com relação ao Al sem reforço. O aumento da dureza é aproximadamente proporcional ao aumento do teor de reforço.

4.3. Expansão Térmica

A figura 4.32 apresenta curva típica de dilatação x temperatura dos compósitos analisados. Observa-se crescente dilatação com o aumento da temperatura; na relação dilatação x temperatura obtida calcula-se o coeficiente de expansão térmica. Nota-se no início do gráfico um efeito de redução da dilatação com o aumento da temperatura, o qual corresponde à uma acomodação do material e equipamento de medição; este efeito é similar para

diferentes corpos de prova analisados. Esta seção do gráfico é rejeitada na análise do coeficiente de dilatação térmica do material.

Os resultados gerais dos ensaios são apresentados no Apêndice VIII, e os valores médios obtidos são mostrados na tabela 4.16.

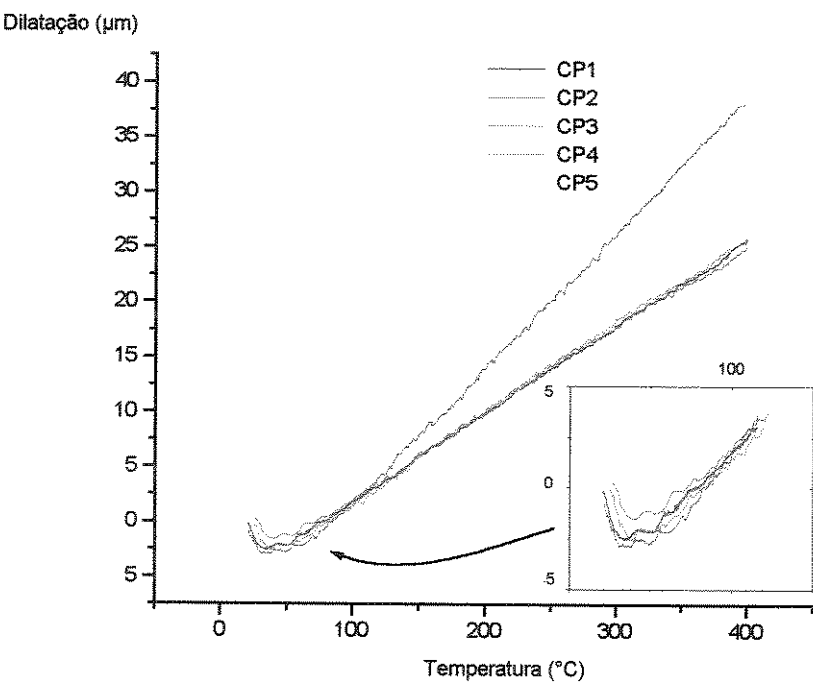


Figura 4.32- Curva típica de dilatação x temperatura dos materiais analisados (caso específico do composto Al-NbC 10%vol, desde a temperatura ambiente até 400 °C).

Tabela 4.16- Coeficientes de expansão térmica dos compostos Al-NbC.

MATERIAIS	$\alpha \cdot 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$
Al	33,98±0,06
Al-NbC 5%	28,19±0,19
Al-NbC 10%	27,33±0,36
Al-NbC 15%	25,20±0,43

Estes resultados são apresentados graficamente na figura 4.33.

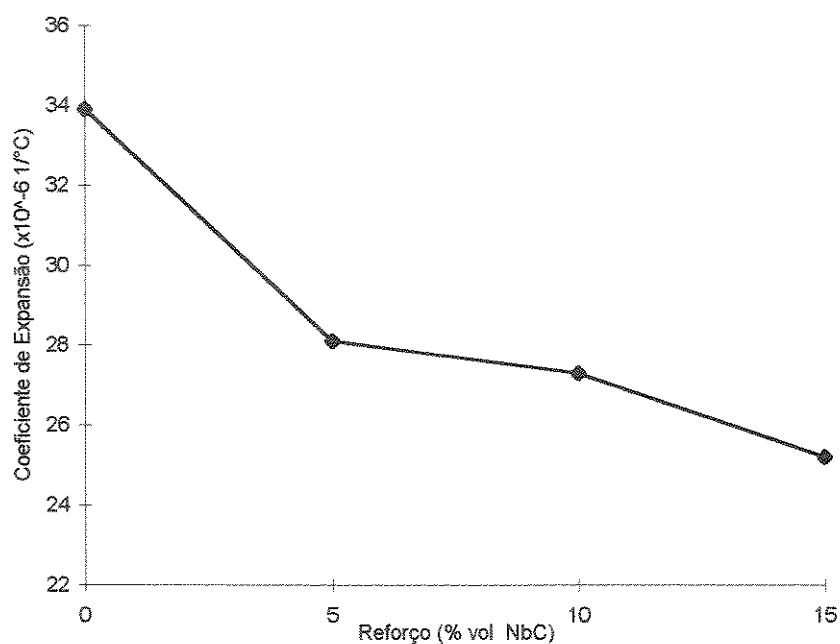


Figura 4.33-Variação do coeficiente de expansão térmica com teor de reforço nos compostos Al-NbC e no Al.

Nota-se como o coeficiente de expansão térmica decresce com o aumento da quantidade de reforço: para o composto contendo 5% vol de NbC a redução, com relação ao Al, é de 17%, aumentando esta diminuição para valores de 20% e 26% para os compostos contendo 10 e 15% vol respectivamente.

Estes valores de redução de expansão térmica são significativos, tornando os compostos Al-NbC interessantes opções em aplicações regidas por severos critérios de estabilidade dimensional.

4.4. Densidade Aparente

Os resultados gerais obtidos para medidas de densidade aparente dos materiais analisados são apresentados no Apêndice IX.

A tabela 4.17 apresenta os valores médios das densidades aparentes dos compostos analisados e do Al sem reforço.

Pode ser observado o aumento da densidade com o aumento da quantidade de reforço: para o compósito com fração volumétrica igual a 5%vol NbC, é obtido um acréscimo de 15% na densidade do material com respeito ao Al; este acréscimo sobe para 18% e 21% para os compósitos contendo respectivamente 10 e 15%vol de NbC.

Tabela 4.17- Densidades aparentes dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) e do Al sem reforço.

MATERIAL	Densidade Aparente (g/cm³)
Al	2,65±0,03
Al-NbC (5%vol)	3,06±0,20
Al-NbC (10%vol)	3,14±0,01
Al-NbC (15%vol)	3,20±0,22

O aumento da densidade nos níveis observados, devendo-se a seu reforçamento com NbC, não necessariamente compromete a característica interessante do Al e suas ligas, seu reduzido peso. O aumento de peso pode ser aceitável em aplicações específicas onde ganho em outras propriedades sejam prioritários.

Na figura 4.34, ilustra-se o gráfico densidade porcentagem de reforço, observando-se que entre os compósitos o aumento da densidade é pequeno, da ordem de: 2,5% entre os compósitos contendo 5 e 10% vol NbC; 2% quando comparados os compósitos contendo 10 e 15% vol NbC e da ordem de 4,6% entre os compósitos contendo 5 e 15% do reforço.

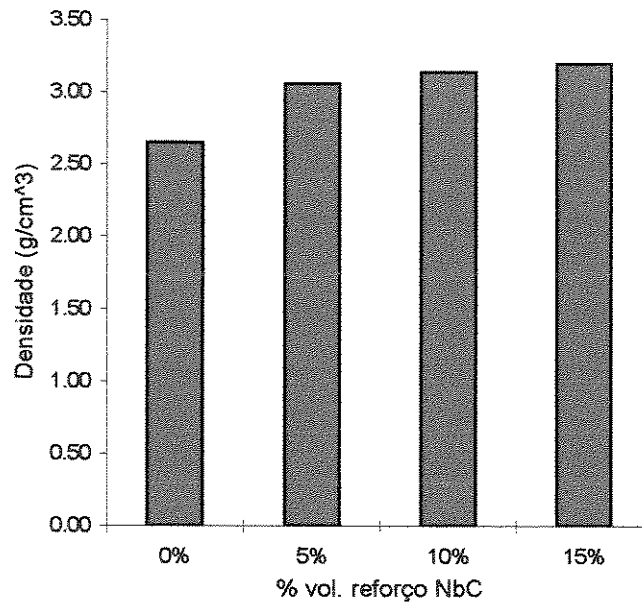


Figura 4.34- Comportamento da densidade aparente dos compósitos Al-NbC (5,10,15%vol) e do Al sem reforço.

4.5. Discussões Finais

Para uma avaliação global dos compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) analisados neste trabalho, são apresentados a seguir os valores obtidos para todas as propriedades caracterizadas.

A tabela 4.18 apresenta os valores das propriedades medidas enquanto a tabela 4.19 apresenta as variações percentuais desses valores com relação aos obtidos para o Al sem adição de reforço.

Quanto às propriedades mecânicas em tração, pode-se observar o significativo aumento nos limites de resistência (da ordem de 21 a 24%) e limite de escoamento (da ordem de 46 a 23%) do Al pela adição do reforço NbC em teores de 5 a 15% vol.

Tabela 4.18- Resumo das propriedades dos compósitos Al-NbC.

PROPRIEDADES GERAIS DOS COMPÓSITOS Al-NbC				
PROPRIEDADE	Al	Al-NbC 5%vol	Al-NbC 10%vol	Al-NbC 15%vol
LR (MPa)	116±1	141,00±0,09	144,00±0,22	147,00±0,06
LE (MPa)	81±1	118,00±0,57	100,00±1,27	99,00±1,20
A (%)	28±4	27,00±2,52	20,00±1,36	16,00±0,58
Z (%)	43±1	29,00±1,22	9,00±1,24	4,00±1,28
W (Cond.-3) Lixa 220/carga 506g	4,59±0,01	3,56±0,02	1,84±0,03	0.93±0,01
Dureza (HB)	29,89±0,43	35,49±0,52	38,66±0,37	42,01±0,18
$\alpha \cdot 10^{-6}$ (°C)	33,98±0,06	28,19±0,19	27,33±0,36	25,20±0,43
ρ (g/cm ³)	2,65±0,03	3,06±0,20	3,14±0,01	3,20±0,22

Observa-se também que no caso de LR, um bom resultado já é obtido com adição de 5% vol de NbC, aumentos no teor do reforço até 15% vol não implicam em substancial aumento nesta propriedade.

Também para o compósito contendo 5% vol NbC o valor de LE foi o mais alto: acréscimos até 15% vol do reforço não significam aumento no valor de LE.

Quanto à capacidade de deformação, claramente revelada pelas medidas de A e Z, a presença do reforço se mostrou altamente prejudicial, quando teores do reforço de 10 e 15% vol foram utilizados.

Tabela 4.19- Variações percentuais de propriedades do Al quando é reforçado com NbC; produzido via metalurgia do pó, na condição extrudada.

VARIAÇÕES PORCENTUAIS DE PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS COM RESPEITO AO Al.			
PROPRIEDADES	Al-NbC 5%vol	Al-NbC 10%vol	Al-NbC 15%vol
LR (MPa)	21%↑	24%↑	27%↑
LE (MPa)	46%↑	23%↑	22%↑
A (%)	4%↓	28%↓	43%↓
Z (%)	32%↓	78%↓	90%↓
W (Cond.-3) Lixa 220/carga 506g	22%↓	60%↓	80%↓
Dureza (HB)	19%↑	29%↑	40%↑
$\alpha \cdot 10^{-6}$ (°C)	17%↓	20%↓	26%↓
ρ (g/cm ³)	15%↑	18%↑	21%↑

De maneira geral pode-se dizer que, com relação às propriedades mecânicas em tração, o compósito Al-NbC (5% vol) apresenta a melhor relação benefício/prejuízo, quando comparado com os compósitos analisados contendo maiores teores do reforço.

Quanto ao desgaste, pode-se observar a sua significativa redução quando partículas do reforço são adicionadas ao Al. Neste caso, a melhoria do comportamento do material é proporcional ao teor do reforço adicionado, podendo chegar a 80% de redução no desgaste, para teores de 15% vol NbC. Este valor é bastante significativo, indicando potenciais aplicações do compósito em produtos onde a resistência à abrasão seja mandatória.

Com relação à dureza observa-se aumentos nesta propriedade à medida que a porcentagem de reforço cresce, chegando até valores de 40% para o compósito contendo 15% vol NbC.

Com relação à expansão térmica, nos compósitos analisados mostra-se uma diminuição deste coeficiente, devido à presença das partículas do reforço as quais, apresentam uma elevada estabilidade térmica. O reforço de NbC não permite que a matriz de Al dilate, absorvendo com isto grande parte da energia térmica aplicada aos compósitos.

Com relação à variação da densidade nota-se um aumento desta com valores de até 21% com relação ao Al sem reforço, correspondendo este valor para o compósito com maior porcentagem de reforço. O aumento da densidade pode não comprometer a utilização dos compósitos, em aplicações específicas onde os requisitos de propriedades mecânicas e expansão térmica sejam mais importantes que o peso do produto.

Os compósitos analisados abrem um novo caminho no campo da investigação; os resultados obtidos indicam de modo geral a melhoria da qualidade do Al, com aumentos significativos em algumas propriedades, pela adição de partículas de reforço NbC.

Portanto, de forma geral a adição do reforço NbC ao Al representa uma influência positiva em termos de LR, LE, α , dureza e W .

A influência negativa em A, Z e ρ podem ser suportadas, dependendo da aplicação do material.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Conclusões

O estudo dos compósitos Al-NbC feito neste trabalho oferece caracterizações mecânico-metalúrgicas desses materiais até o momento não disponíveis na literatura especializada. São estas:

➡ Quanto à caracterização metalúrgica

- ⇒ Os compósitos Al-NbC (5, 10, 15%vol), produzidos por metalurgia do pó, segundo o procedimento descrito no trabalho, apresentaram dispersão do reforço NbC macroscopicamente homogênea por toda a matriz em toda a extensão do produto (barra de 150 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro). O procedimento de fabricação adotado também permitiu a obtenção de produtos livres de danos superficiais e nas partículas do reforço.
- ⇒ As microestruturas dos compósitos apresentaram tendência à aglomeração das partículas do reforço à medida que o seu teor aumenta. Não foram observadas alterações nas dimensões das partículas de NbC durante o processamento dos compósitos.

- ⇒ As microestruturas mostraram também ausência de porosidade e ausência de orientação da distribuição das partículas de reforço, indicando que os esforços de extrusão foram totalmente transferidos para a compactação do material.
- ⇒ Microanálises realizadas nos três compósitos indicaram a ausência de reações aparentes entre o reforço e a matriz: não foram detectadas outras fases além de Al- α e NbC.

⇒ Quanto à caracterização mecânica (tração, desgaste e dureza)

- ⇒ Os compósitos apresentam LR superiores ao do Al sem reforço: 21, 24 e 27% superiores, respectivamente nos compósitos contendo 5, 10, 15% vol NbC.
- ⇒ Os compósitos apresentam LE superiores ao do Al sem reforço: 46, 23, 22% superiores, respectivamente nos compósitos contendo 5, 10, 15% vol NbC.
- ⇒ Os compósitos apresentaram A inferiores ao do Al sem reforço: 4, 28, 43% inferiores, respectivamente nos compósitos contendo 5, 10 e 15% vol NbC.
- ⇒ Os compósitos apresentaram Z inferiores ao do Al sem reforço: 32, 78, 90% inferiores, respectivamente nos compósitos contendo 5, 10 e 15% vol NbC.
- ⇒ Com relação às propriedades em tração, a melhor relação benefício/prejuízo é obtida para o compósito contendo 5% vol NbC.
- ⇒ Os compósitos apresentaram W inferiores ao do Al sem reforço. Na condição mais severa de teste utilizadas reduções de 22, 60 e 80% no valor de W foram observadas nos compósitos contendo 5, 10 e 15% vol de NbC, respectivamente, com relação ao Al sem reforço.

- ⇒ Os compósitos apresentaram macrodureza (HB) crescentes com o crescente teor de reforço, alcançando valores de incrementos de 19, 29% e 40% para os compósitos (5,10, 15% vol), respectivamente, com relação ao Al sem reforço.

⇒ Quanto à expansão térmica

- ⇒ O coeficiente de expansão térmica dos compósitos analisados decresce linearmente com o aumento da quantidade de reforço: para o compósito com 5% vol de NbC a redução, com relação ao Al, é de 17%, aumentando para valores de 20% e 26% para os compósitos com 10 e 15% vol respectivamente.

⇒ Quanto à densidade

- ⇒ A densidade nos compósitos analisados aumenta linearmente com o aumento do teor de reforço: um acréscimo de 15% na densidade do material com respeito ao Al é obtido para o compósito contendo 5% vol NbC; este acréscimo aumenta para 18% e 21% para os compósitos contendo respectivamente 10 e 15%vol NbC.

Conclusões gerais

- ⇒ Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a possibilidade de fabricação de um novo tipo de compósito de matriz metálica particulado, a partir de matérias-primas abundantes no Brasil: Al-NbC.
- ⇒ Os compósitos Al-NbC (5, 10, 15% vol) no estado como extrudado fabricados a partir de técnicas de metalurgia do pó, apresentam uma distribuição do reforço bastante homogênea ao longo de cada barra, garantindo a consistência de suas propriedades.
- ⇒ As características mecânicas dos compósitos produzidos, quanto à dureza, tração, desgaste e expansão térmica são superiores ao Al sem reforço; a presença do reforço aumenta a densidade aparente do material e reduz sua capacidade de deformação.
- ⇒ O conhecimento das características mecânicas/metalúrgicas estudadas neste trabalho dos compósitos Al-NbC, abre mais ainda a atratividade dos compósitos no campo dos materiais, ao fornecer um novo produto à criatividade dos usuários de materiais de engenharia.
- ⇒ Novos produtos e aplicações podem advir do novo, e agora caracterizado, tipo de compósito.
- ⇒ Pode-se pensar em aplicações tais como componentes de motores para a indústria automobilística, componentes para a indústria aeronáutica e uma infinidade de aplicações específicas que combinem as características destes compósitos, de boas propriedades mecânicas, superior resistência ao desgaste, reduzida expansão térmica associados ao não comprometimento significativo do peso.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- ✓ Produzir e testar compósitos Al-NbC com porcentagens elevadas de reforço, com a finalidade de analisar o limite de benefícios, isto é, detectar a partir de que teor de NbC as propriedades mecânicas começam a decrescer.
- ✓ Analisar mecanismos de fratura em corpos de prova dos compósitos Al-NbC.
- ✓ Analisar a interface reforço/matriz com uso de recursos mais sofisticados, para detecção de reações ou difusões de interface ou falta de interação entre os constituintes.
- ✓ Realizar outros tipos de ensaios de tração para temperaturas elevadas (150°C), para observar se as propriedades refratárias do reforço fornecem especial comportamento à elevadas temperaturas.
- ✓ Verificar a influência de tamanhos vários de partículas do reforço, nos compósitos Al-NbC, sobre as propriedades mecânicas destes, principalmente em ensaios de resistência ao desgaste.
- ✓ Testar o comportamento mecânico dos compósitos à compressão e à fadiga, bem como sua tenacidade à fratura.
- ✓ Testar aplicações para estes compósitos, via processos de fabricação de componentes.
- ✓ Testar usinabilidade e definir parâmetros para aplicação deste tipo de ensaio nestes compósitos.
- ✓ Desenvolver técnicas para a caracterização da distribuição de partículas a nível microscópico (para detecção de aglomerados) e analisar a influência desta nas propriedades do compósito.

Referências Bibliográficas

- ABE, Y. et al. Alumina/Aluminium Composites Fabricated by Squeeze Casting. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 1, 1985, França. **Proceedings...** França: 1985, p. 604-627.
- ALPAS, A. T.; ZHANG, J. Effect of Microstructure (Particulate Size and Volume Fraction) and Material on the Sliding Wear Resistance of Particulate-Reinforced Aluminium Matrix Composites. **Metallurgical and Materials Transactions A**. Canada, v.25a; p. 969-983, Maio de 1994.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS, EUA. **ASTM-E8**; Stress Test, 1996. 25p.
- ASANUMA, H.; OKUDA, A. Studies on The Fabrication of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Composites by Plasma Spray and Roll Diffusion Bonding Method. **Journal Japan Inst. of Metals**, Japão, v. 48, n. 11, 1984, p.1119-1126.
- ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Metals**. Von: Nortrand Reinhold, 1987 (International).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. **NBR-6623**, determinação de dureza, método de ensaio. Rio de Janeiro, 1981. 17 p.

- BACON, M. Metal Composites Engineering Materials Solutions. **Materials Edge**, p. 33-41, Julho/Agosto de 1989.
- BALASUBRAMANIAN, P. K.; WEANER, S.C. Casting and Extrusion Characteristics of an Al-Zn-Mg Alloy Composite Containing TiO_2 Dispersions. **Composite Science and Technology**. v. 39, 1990, p. 259-425.
- BRACKE, P. ; et al. Inorganic Fibers and Composite Materials. **Pergamon Press**, Oxford, U.K. 1983.
- BROOKS, R. G. et al. **The Osprey Process**. Powder Metallurgy, n2, 1977, p100-102.
- BROUTMAN, L. J.; KROCK, R. **Composite Materials Metallic Matrix Composite**. Kreider, G. K. Academic Press, New York, 1974, v. 4.
- CARON, S.; MASOUNAVE, J. A Literature Review on Fabrication Techniques of Particulates Reinforced Metal Composites. In. INT. CONFERENCE ON FABRICATION OF PARTICULATE REINFORCED METAL COMPOSITES, 1, 1990, Montreal, **Proceedings...** Montreal, Setembro 1990, p. 79-86.
- CARVALHO, B. R.; ROBERT, M. H. Caracterização Microestrutural de Compósitos de Matriz Al-5,7%Cu Reforçada com 30% vol de Fibras Al_2O_3 . do X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 5, 1992, Águas de Lindoia. **Anais...** Águas de Lindoia, 1992, vol 1, p. 335-339.
- CHAWLA, K. K. **Composite Materials - Science and Technology**. Springer-Verlag, New York, 1987.
- CORNIE, J. A. et al. Processing of Metal and Ceramic Matrix Composite. **Ceramic. Bulletin**, vol 65, n. 2, 1986, p. 293-304.
- COHRT, H.; MULLER, U. Entwicklung end konturnaher Bauteile Aus Pulvermetallurgisch Hergestellten Leicht metall matrix Verbund

- werkstoffen. **Powder Metallurgy International**, v. 22, n. 6, p. 43-46. 1990.
- CRNKOVIC, S. J. **Comportamento de um Aço ABNT - 1020 Bifásico Revenido quanto ao Atrito e Desgaste**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1993. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993. p. 33-87.
- DAMM, H. **Metalurgia do Pó Definitivamente Consolidada no Brasil**. São Paulo, v.43, n361, p. 916-920. Dezembro de 1987.
- DONOMOTO, N. et al. **Ceramic Reinforced Pistons for High Performance Diesel Engines**. SAE Technical Paper N. 83052, Detroit, EUA, 1983.
- DUDEK, H. J. et al. **SiC-Fiber Reinforced Ti Alloys, Interfaces and Mechanical Properties**. EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 4, 1990, Stuttgart, **Proccedings...** Alemanha, 1990, p.339-343.
- FREDEI, M. C.; et al. **Componentes de Al Sinterizados: Tecnologia de Fabricação e Caracterização Mecânico-Microestrutural**. In: CBCIMAT, 9, Águas de São Pedro-SP. **Anais...**, Águas de São Pedro, 1990. v. 1. p. 89-93
- FOGAGNOLO, J. B. **Contribuição à análise dos efeitos de parâmetros de processo na qualidade de compósitos obtidos por compofundição**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1996. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993. P.35-70.
- GAHR, K. Z. **Microstructure and Wear of Material**. Amsterdam: Elsevier, 1987. 260 p.
- GERMAN, R. **Powder Metallurgy. Principles and Applications**, New York, MPIF, 1984, cap.1, p 3-6.

- GONÇALVES, J. R. et al. **Experiências de Ciência dos Materiais**. São Paulo. Edgar Blucher, 1973. Cap5: Expansão Térmica dos Materiais Sólidos. p133-147.
- GUIMARÃES, J. R. C. **Materiais Estratégicos**. ACIESP, São Paulo, 1987.
- HIROSE, A. et al. Properties of NbC-TiAl and TiB₂ - TiAl Composites Produced by Plasma Transferred Arc Process. **Materials Science and Technology**, v12, p1057-1063. Dezembro de 1996.
- HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge Cahn and Davis, 1981. 246p.
- HUNT, W. H.; et al. Microstructure. Property Relationship for a Al/SiC Composite with Different Deformation Histories. In: FABRICATION OF PARTICULATES REINFORCED METAL COMPOSITES, ASM INTERNATIONAL CONFERENCE,1, 1990, **Proceedings...** Montreal, Setembro 1990, p. 503-507.
- ISHIKAWA, K. **Compocast Process to Mix Solidifying Metal with Nonmetallic Particles**. Netsu-shori, vol31, p.119, Janeiro 1991.
- JAMES, E. F.; DeFRANCO D. The Northstar CamBearing Caps: A New Application for Aluminum P/M, SAE INTERNATIONAL CONGRESS, 1994, **Proceedings...** Fevereiro de 1994. p. 334-339
- JARFORS, A.E.W. Solubility of Copper in Titanium Carbide. **Materials Science and technology**, vol 12, p. 990-994, dezembro de 1996.
- KELLY, A; MILEIKO, S. T. **Fabrication of Composites**. Amsterdam: Rabotnov, 1983. 574 p.
- KING, Frank **Aluminium and its Alloys**. England Ellis Horwood, 1987. 313 p.
- KOBASHI, A.; CHOH, T. Effect of Alloying Elements on Particulate Dispersion in Liquid Aluminium. **Journal Japan Institute Metals**, Japão,v.54. p76. Setembro 1990.

- KOGUCHI, H. et al. Dry Wear of Al-Chopped C Fiber Composites Fabricates by Powder Metallurgical Process. **Trans. of the Japan Institute of Metals**, v. 24, n.2, 1983, p.101-108.
- KREIDER, K. G.; PREWO, K.W. Metal Matrix Composites, series on Composite Materials, vol 4. **Academic Press**, New York, 1974.
- KRUSHOW, M. M.; BABICHEV, M. M. V. A New Model for two-Body Abrasive Wear Based on the Localization of Plastic Deformation. **Wear**, v.117, 1987.
- LAURENT, V.; CHATAIN, D. ESTATHUPOULOS, N. Wettability of SiC by Al and Al-Si Alloys. **Journal Materials Science**, v. 22, 1987, p. 244-250.
- LEONARD, A J.; et al. Microstructural Changes Induced by Dry Sliding Wear of a A3557/Sic Metal Matrix Composite. **Materials Science and technology**. v13, p. 41-48. Janeiro de 1997.
- LI, Q.; McCARTNEY, D. G.; WALKER, A M. Influence of Safimax Fiber on Microstruture and Microsegregation in an Aluminium Alloy. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COPOSITE MATERIALS, 4, 1990, Stuttgart, **Proccedings...** Alemanha, 1990, p. 351-356.
- MARSDEN, K. Commercial Potentials for Composites. **Journal of Metals**, Junho de 1985, p. 59-62.
- MASOUNAVE, J. et al. Abrasion Behavior of Particulate Reinforced Composite. In. INT. CONFERENCE ON FABRICATION OF PARTICULATE REINFORCED METAL COMPOSITES, 1, 1990, Montreal, **Proccedings...** Montreal, Setembro 1990, p. 271-276.
- MEHRABIAN, R. et al. Casting of Partially Solid Metals and Nonmetals Composites. SDCE INT. DIE CASTING EXPOSITION CONGRESS, 1, 1977, Winsconsin. **Proccedings...** Winsconsin, EUA, June 1977, p1-13.

- MEHRABIAN, R.; RIEK, R. G. and FLEMING, M. C. Preparation and Casting of Metal Particulate Non-Metal Composite. **Metallurgical Trans.**, vol5, p. 1899, Dezembro de 1974.
- METCALFE, A G. **Interfaces in Metal Matrix Composites**. Academic Press, New York, London, 1974.
- MIWA, K. Fabrication of SiCp Reinforced Aluminium Matrix Composites by Compocasting Process. **Imono (J. Japan Foundymen's Soc.)**, vol62, p 423. Novembro 1990.
- MORTENSEN, A **Solidification of Al-4,5%wtCu in the Presence of SiC Fibers**. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- MOURISCO, A. J. **Preparação e Caracterização de Compósito de Matriz de Alumínio 1100 em Partículas de SiC por Metalurgia do Pó**. São Paulo: IPEN, USP, 1995. Tese (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1995. p. 10-76.
- MOURISCO, A J. Preparação e Caracterização de Compósitos de Matriz de Alumínio 1100 Reforçado com Partículas de SiC por Metalurgia do Pó. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 12, 1996, Águas de Lindóia-SP: **Anais...** São Paulo: ABM, 1996. V.2, p. 765-768.
- OKADA, A. et al. **Wear and Frictional Characteristics of C-Fiber (Al-Cu) Composites**. Trans. of the Japan Institute of Metals, Vol 5, n. 10, p. 723-729. Janeiro 1984.
- OSAWA, K. et al. Compocasting Conditions and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composite Reinforced by SiC Particles. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 3, 1994, Japan. **Proceedings...** p.429-439.

- PIGGOTT, M. R. **Load Bearing Fiber Composites**. Inst. Series on the Strenght and Frature of Materials ans Structures, Pergamon Press, 1980. p. 53-56.
- ROBERT, M. H.; URTIGA, S. L. Mechanical Properties of Al-NbAl₃ *In Situ* Composites. **Journal of Materials Processing Technology**. v.64, p.335-341, 1997.
- ROHATGI, P.; WEAVER, S. C. **Metal Matrix Composites-Advances in Materials Technology: MONITOR**. Unido, n.17, fevereiro de 1990.
- ROHATGI, P. K. et al. Solidification, Structure and Properties of Cast Metal-Ceramic Composite. **Int. Metals Review**, 1986, v. 31, p115-139.
- ROHATGI, P. K.; et al. Aluminum Alloy-Fly ash Composite (Ashalloy)- Future Foundry Products for Automotive Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AL ALLOY, 4, 1994, Atlanta. **Proceeding...** Atlanta, 1994, v. 2, p. 567-574.
- ROSSI, J. L. et al. Preparação e Caracterização de Compósito de Matriz de Alumínio 1100 Reforçado com Partículas de SiC por Metalurgia do Pó. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 12, 1996, Águas de Lindóia-SP: **Anais...** São Paulo: ABM, 1996. v.2, p. 148-151.
- SATO, A. Compocasting Process. **Imono (J. Japan Foundrymen's Soc.)**; v.53, p.698. 1981.
- SMITH, P. R.; FROES, F. H. **Journal of Metals**, 36-19, Março de 1984, p. 19-25.
- SYMPOSIUM AMERICAN SOCIATY FOR TESTING AND MATERIALS. Selection and Use of Wear Test for Metals, novembro, 1975.
- TERAO, N. Effect of Copper and Manganese on the Mechanical Properties of Metallic Composite Materials Based an the Eutectic Al-5,7%Ni Alloy. **Journal of Materials Science**, 20, 1995, p. 4021-4025.

- TSAKIROPOULOS, P. **Atomização de Metais Ciência e Aplicações**. Curso oferecido no IPEN, São Paulo, Março de 1993.
- URTIGA, S. L. **Obtenção e Caracterização de Compósitos do Tipo in situ no Sistema Al-Nb**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1994. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994 p. 93-173.
- VACCARI, J. A. **Já Chegaram os Compósitos com Matriz de Al Fundido**. Máquinas e Metais, dezembro de 1991, p28-35.
- VERHOEVEN, J. D. et al. Preparation of Cu-Nb alloys for Multifilamentary in Situ Uperconducting Wire. **Journal of Materials Science**, n. 15, 1980, p. 1449-1455.
- VINSON, J. R.; CHOU, T. W. Composite Materials and their Use in Structures. **Materials Science Applied**, London, 1975, p. 74-80.
- YAMADA, K. et al. The Optimum Condition of Compocasting Method of the Particle Reinforced MMC. In: INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM, 34, 1992, Japan. **Proceedings...**1992, v.12, p. 2266-2275.

Bibliografia Adicional Consultada

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR-7549**; Alumínio, Magnésio e suas Ligas - Ensaio de Tração dos Produtos Dúcteis e Fundidos. Met. de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 25p.
- BAYOUMI, M. A.; KOUTA, F. New Approach for the Production of Duplex Composite Engineering Components. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 4, 1996, Sheffield. **Proceedings...** Sheffield: Kirkwood and Kapranos, 1996. p. 356-359.
- 50 ANOS DEPOIS, Brasil é o sexto maior produto de Alumínio, Metalurgia & Materiais, ABM, São Paulo. V.51, n. 443, julho 1995, p. 599.
- FELLI, F. et al. Structure, Fracture Toughness, and Fatigue of Two Aluminium Matrix Composites Produced by Vertical Squeeze Casting Technique. **Materials Science and Technology**. v. 13, p. 420-428, Maio de 1997.
- GMP (Grupo de Materiais e Processos): **Perfil Analítico do Nióbio**, Edit. Unicamp, Campinas, 1977.
- GRUPTA, M. et al. Effect of Temperature in Single Phase Regime on Aging Response of (Al-2Cu)/SiC Metal Matrix Composite Synthesised Using Desintegrated Melt Deposition Technique. **Materials Science and Technology**, v. 13, p. 187-191, Março de 1997.
- GRUPTA, M.; MANOHARAN, M. Effect of Aging on Work Hardening Behavior of SiC Reinforced Aluminium Metal Matrix Composite. **Materials Science and Technology**. v. 13, p.523-525, Junho de 1997.

- GUY, A. G. **Physical Metallurgy for Engineers**. Florida: Addison Wesley, 1970. Cap 7: Elastic and Plastic Deformation. P. 223-227.
- HAGE, E. **Compósitos e Blendas Poliméricas**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1989. Apostila. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1989. P. 2-121.
- HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. Cambridge Cahn and Davis, 1981. 246p.
- JARFORS, A.E.W. Solubility of Copper in Titanium Carbide. **Materials Science and Technology**, vol 12, p. 990-994, dezembro de 1996.
- LEE, J.C.; KIM, G.H.; LEE, H.I. Characterization of Interfacial reaction in (Al₂O₃)p/6061 Aluminium Alloy Composite. **Materials and Technology**, v.13, p.182-186, Março de 1997.
- LOBIANCO, S.; VARELLA, M.; ROCHA, J. C. Estudo de Parâmetros de Processamento de Produto de Liga de Alumínio Obtido Via Metalurgia do Pó. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 12, 1996, Águas de Lindóia-SP: **Anais...** São Paulo: ABM, 1996. v.2, p. 1148-1151.
- LU, L.; LAI, M. O.; YAP, S. H. Microstructure and Mechanical Properties of Al-4-5wt-%Cu/15wt-%SiC Composite Prepared Using Ball Mill. **Materials Science and Technology**, v. 13, p. 192-202, Março de 1997.
- MALLICK, P. K. **Fiber Reinforced Composites**. New York: Faulkner and Menkes, 1988. 469p.
- MONDOLFO, L. **Aluminium Alloys: Structure and Properties**. Ed. Butterworths, Londres, 1976, p. 253-278.
- NAIR, C. G. K. et al. Influence of Casting of SiC Particulates on the Microstructures and Mechanical Properties of Aluminium Alloy Matrix Composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERFACES IN

- METAL-CERAMICS COMPOSITES, 1, 1990, Anaheim. **Proceedings.....**
California. LIN TMS, 1990. p.291-302.
- OSMAM, T. M.; LEWANDOWSKI, J. J. Enhanced Fracture Resistance in Layered Discontinuously Reinforced Aluminium. **Materials Science and Technology**, v. 12, p. 1001-1006, Dezembro de 1996.
- PARTRIDGE, P. G.; SMITH, D.; ZOU, Y.Q. Comparative Analysis of Mechanical Properties of Laminates Composed of Layers of Titanium Alloy and Tittanium Alloy metal Matrix Composite. **Materials Science And Technology**, v. 12, p. 911-916, Novembro de 1996.
- RELATORIO PRIVADO.Metal Matrix Composite Information and Analysis Center, **Defese Advanced Research Projects Agency**, EUA, 1986.
- ROHATGI, P. K.; et al. Cast Lead-free Copper Graphite Composite Alloys with Improved Machinability. **AFS transaction**, 1992, vol 159, p. 1-8.
- SHULZE, K. K. Preparation and Characterization of Ultra-High-Purity Niobium. **Journal of Metals**, v. 33, n5, 1981.
- SUCH, B. K. et al. Fabrication, Microstructures, and Tensite Properties of Magnesium Alloy AZ91/SiCp Composite Produced by Powder Metallurgy. **Materials Science and Technology**. v. 13, p. 590-595. Julho de 1997.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios da Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. Cap.1: Características exigidas nos materiais usados em engenharia. p. 1-11.
- XU, X. X.; KING, J. E. Tensile Properties of as Fabricated, aged, and Streched SiC Whisker and Particle Reinforced 2009 Aluminium Alloy. **Materials Science and Technology**, v. 12, p. 911-916, Novembro de 1996.
- YIP, T. H.; WANG, Z. Effect of Particle Distribution on Deformation Behavior of Particulate Metal Matrix Composites. **Materials Science and Technology**, vol 13, p.125-134, Fevereiro de 1997.

ZOQUI, E. J. Obtenção e Caracterização Mecânico Metalúrgica da Liga Al 4,5 wt % Cu no Estado Reofundido. FEM, UNICAMP, 1995. Tese (Doutorado)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. p. 75-98.

Apêndices

Apêndice I- Programa Utilizado para Análise de Distribuição de Partículas do Reforço

A seguir apresenta-se o programa utilizado na análise da distribuição do reforço, fornecido pelo Instituto de Física/UNICAMP:

```
[Template - Initial]
Number of fields=1
Read only=no
Image Frame x posn=0
Image Frame x posnSym=IFRAMEX
Image Frame y posn=0
Image Frame y posnSym=IFRAMEY
Image Frame width=512
Image Frame widthSym=IFFRAMEW
Image Frame height=456
Image Frame heightSym=IFFRAMEH
Measure Frame x posn=31
Measure Frame x posnSym=MFRAMEX
Measure Frame y posn=61
Measure Frame y posnSym=MFRAMEY
Measure Frame width=450
Measure Frame widthSym=MFRAMEW
Measure Frame height=394
Measure Frame heightSym=MFRAMEH
Selected Frame=Measure Frame
Display results=yes
Print results=no
Separate pages=yes
File results=no
Field results file name=FLD.Q5D
Feature results file name=FTR.Q5D
Ftr Histogram results file name=HST.Q5D
Meas Grey results file name=MGR.Q5D
Manual IA results file name=MMS.Q5D
Meas Profile results file name=MPR.Q5D
```

```

Routine variable results file name=VAR.Q5D
Results file auto increment=no
Results file: prompt at run time=no
Results heading: Selection=no header
Results heading: System and Version enabled=no
Results heading: User Name enabled=no
Results heading: Routine Name enabled=no
Results heading: Time and Date enabled=no
Results heading: Calibration Value enabled=no
Results heading: Specimen ID enabled=no
Results heading: Descriptive Text enabled=no
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=@Marco Pallini - mar/97 - "Distribuição de Poros ou Partículas"
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[PauseText]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Pause Text=***Digite o número de campos em que deseja medir poros, e
                pressione OK...
[Input Variable]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Variable name=NR.CAMPO
Channel=0
ChannelSym=CHAN
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[Clear Flags]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
[Grey Util]
Pause=disabled
DataOutput=enabled

```

```

Symbolic=disabled
Text=
Input=Image1
InputSym=GREYUTILIN
Output=Image1
OutputSym=GREYUTILOUT
Mode=Clear all
Clear To=0
Clear ToSym=CLRTO
Zoom Size=1
Zoom SizeSym=ZOOM
[Clear Histogram]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Number =1
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[PauseText]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Pause Text=***Ajuste a iluminação do microscópio ("White" em torno de
0,9) e pressione OK...
[Image Setup]
Pause=enabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Gain=96.00
GainSym=IMSGAIN
Offset=20.00
OffsetSym=IMSOFFSET
Lamp Volts=49.99
Lamp VoltsSym=IMSVOLTS
Camera=Camera 1
CameraSym=CAMERA
[PauseText]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Pause Text=***Selecione a objetiva adequada, e pressione OK...
[Select Lens]
Pause=enabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
MAGCHANGER=Mag 1
MAGCHANGERSym=MAG.CHANGER
TURRET=Incident
TURRETSym=TURRET

```

```

CURRENTLENS=Lens 3
CURRENTLENSSym=LENS
Micromarker=OFF
Micromarker Background=OFF
Micromarker bottom=OFF
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[For]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Variable=l
From=1
To=NR.CAMPO
Step=1
Goto=00001F3D
[Output New Page]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
[Output Text]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Text String=CAMPO
Tab After=no
Field Width=7
Right Justify=no
Pad With Zeroes=no
Digits After Point=4
[Output Variable]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Variable name=l
Tab After=no
Field Width=3
Right Justify=no
Pad With Zeroes=no
Digits After Point=0
[Output Text]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Text String=DE
Tab After=no
Field Width=4
Right Justify=no
Pad With Zeroes=no

```

```

Digits After Point=4
[Output Variable]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Variable name=NR.CAMPO
Tab After=no
Field Width=3
Right Justify=no
Pad With Zeroes=no
Digits After Point=0
[PauseText]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Pause Text=***Selezione "Live", escolha o campo, ajuste corretamente o
                foco, e pressione OK...
[Grab Image]
Pause=enabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Mode=Aquire
Average=2
AverageSym=ACQCYCLES
Integration=2
IntegrationSym=
Acquire by Integration=0
Output=Image1
OutputSym=ACQOUTPUT
Colour Smooth=0
Colour Space=351
Colour Mode=0
Colour Process=7
Data from File=0
Image File=C:\TRASH\PORO.TIF
Image FileSym=ACQFILE$
File Type=TIF
[Annotate]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----
[Transform]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Input=Image1
InputSym=TRANINPUT
Output=Image2
OutputSym=TRANOUTPUT
Mode=Delineate
Cycles=1
CyclesSym=TRANCYC

```

Depth=1
 [Grab Image]
 Pause=disabled
 DataOutput=enabled
 Symbolic=disabled
 Text=
 Mode=Aquire
 Average=2
 AverageSym=ACQCYCLES
 Integration=2
 IntegrationSym=
 Acquire by Integration=0
 Output=Image0
 OutputSym=ACQOUTPUT
 Colour Smooth=1
 Colour Space=351
 Colour Mode=0
 Colour Process=7
 Data from File=0
 Image File=C:\QWINV20B\PYRITE20.TIF
 Image FileSym=ACQFILE\$
 File Type=TIF
 [PauseText]
 Pause=disabled
 DataOutput=enabled
 Symbolic=disabled
 Text=
 Pause Text=***Faça a detecção dos poros ou particulas, e pressione OK...
 [Detect]
 Pause=enabled
 DataOutput=enabled
 Symbolic=disabled
 Text=
 Image=Image2
 ImageSym=DETIMAGE
 Output=Binary0
 OutputSym=DETBINARY
 Mode=Black
 Upper Threshold=103
 Upper ThresholdSym=DETUPPER
 Lower Threshold=184
 Lower ThresholdSym=DETLLOWER
 Delineate=off
 Colour Space=350
 Colour Smooth Det=1
 Colour Bandwidth=12
 Hue offset=0
 Colour Multi=0
 Threshold 1=0
 Threshold 1Sym=COLDETTTHR1
 Threshold 2=0
 Threshold 2Sym=COLDETTTHR2
 Threshold 3=0
 Threshold 3Sym=COLDETTTHR3
 Threshold 4=0
 Threshold 4Sym=COLDETTTHR4
 Threshold 5=0
 Threshold 5Sym=COLDETTTHR5

```

Threshold 6=0
Threshold 6Sym=COLDETTTHR6
[Binary Identify]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Input=Binary0
InputSym=BINIDIN
Output=Binary1
OutputSym=BINIDOUT
Mode=FillHoles
Skel Points=Triples
Skel Type=Black
[Measure Feature]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Count Flags=Yes
Feature Param Mode=All
Label Parameter=Area
Ferets=64
FeretsSym=FERETS
Min Area=2
Min AreaSym=MINAREA
Input=Binary1
InputSym=MFEATINPUT
Grey Image=Image0
Grey ImageSym=FTRGREY.IMAGE
Coinc Mode=1
Coinc ModeSym=COINC.MODE
Coinc Param=101
Coinc ParamSym=COINC.PARAM
Coinc Image=Image0
Coinc ImageSym=COINC.IMAGE
Area=selected
X FCP=selected
Y FCP=selected
Roundness=selected
AspectRatio=selected
EquivDiam=selected
Count arraySym=FTRCOUNT(2)
Results arraySym=FTRRESULTS(count,6)

[Feature Histogram]
Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Number =1
Horizontal=no
X Parameter 1=Number
Y Parameter 1=EquivDiam
From 1=0.
From 1Sym=HISTLOWLIM
To 1=30.
To 1Sym=HISTUPLIM

```

LogLin 1=0.
Y axis 1=0.
Percent 1=no
Bins 1=60.
Bins 1Sym=HISTBINS
Results arraySym=HISTRESULTS(HISTBINS)
Stats arraySym=HISTSTATS(14)
Limits arraySym=HISTLIMITS(HISTBINS+1)

[Next]

Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Variable=l
Goto=00000E10

[Annotate]

Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=-----

[Histogram Results]

Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Number =1
Graph=enabled
Statistics=enabled
Bin details=enabled
Horizontal=no
Window X=3
Window XSym=DAWINX
Window Y=228
Window YSym=DAWINY
Window Width=429
Window WidthSym=DAWINW
Window Height=372
Window HeightSym=DAWINH
Window2 X=432
Window2 XSym=GRWINX
Window2 Y=229
Window2 YSym=GRWINY
Window2 Width=360
Window2 WidthSym=GRWINW
Window2 Height=369
Window2 HeightSym=GRWINH

[Annotate]

Pause=disabled
DataOutput=enabled
Symbolic=disabled
Text=
Comment=
[END]

É importante assinalar que o programa descrito somente pode ser utilizado no *software QUERY[®]*, ou *software* Analisador de Imagens. O programa utiliza todos os recursos que o *software QUERY[®]* oferece, garantindo assim uma perfeita detecção das partículas de reforço presentes.

Apêndice II- Fundamentos e Definição de Desgaste

O estudo de desgaste tem sido assunto de interesse prático neste século, ainda que não tenha recebido a devida atenção teórica. A opinião predominante é que é mais prático substituir um componente quando o mesmo encontra-se desgastado, ao invés de projetá-lo para uma vida mais longa durante a fase de projeto. Essas idéias podem ter sido verdadeiras no passado, entretanto com a mudança de mentalidade que se apresenta neste final de milênio, dentro de uma nova ordem econômica, passa a ser vista como uma prática dispendiosa, segundo expressa CRNKOVIC (1993).

Existem várias definições de desgaste, e durante um Simpósio sobre desgaste realizado em 1975 nos Estados Unidos, (SYMPOSIUM,1975), surgiram algumas citações, dentre as quais destacam-se:

- a) Enfraquecimento pelo uso (dicionário Aurélio).
- b) Remoção do material por ação mecânica (ASLE - Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação).
- c) Perda progressiva de substância de superfície de um corpo em operação, ocasionado pelo resultado de movimento relativo na superfície (OECD - Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento).

As definições expostas, não são rigorosamente precisas, uma vez que o fluxo plástico pode ocorrer, e que todas as definições são aproximadas e imprecisões ocorrem. Uma definição mais criteriosa pode ser adotada como sendo: a mais representativa, “remoção não necessária de material por ação química ou mecânica”, segundo ilustra-se no Simpósio (1975).

A) Tipos de Desgaste e Mecanismos de Desgaste Abrasivo

No processo de desgaste manifestam-se diferentes tipos de desgaste, a exemplo de, segundo CRNKOVIC, 1993:

- a) Desgaste Adesivo;
- b) Desgaste Abrasivo;
- c) Desgaste por Fadiga;
- d) Desgaste Erosivo e;
- e) Desgaste Corrosivo.

Desgaste Adesivo: é definido como o desgaste por transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido à formação de junções na fase sólida. As junções adesivamente formadas são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies como resto de desgaste.

Desgaste Abrasivo: definido como desgaste por retirada de material, causado por protuberâncias duras ou partículas duras.

Desgaste por Fadiga: definido como a remoção de material de superfície, proveniente da variação cíclica de carga.

Desgaste Erosivo: definido como sendo a perda de material de uma superfície sólida, devido ao movimento relativo de um fluido em contato, que contém partículas sólidas.

Desgaste Corrosivo: definido como sendo o desgaste em que reações químicas ou eletroquímicas com o meio é que predominam.

Neste trabalho analisar-se-á o comportamento da resistência ao desgaste dos compósitos Al-NbC, com suas diferentes porcentagens de reforço (5, 10 e 15%), assim como do Alumínio puro também, como base comparativa. Para

isso, utilizar-se-á o desgaste abrasivo, escolhido pela disponibilidade de equipamento e facilidade para emitir uma conclusão.

O mecanismo do desgaste abrasivo foi inicialmente proposto por KHRUSHOV & BABICHEV (1987), que identificaram dois processos que ocorrem quando uma partícula abrasiva entra em contato com uma superfície de menor dureza. A figura ilustra esquematicamente estes dois processos.

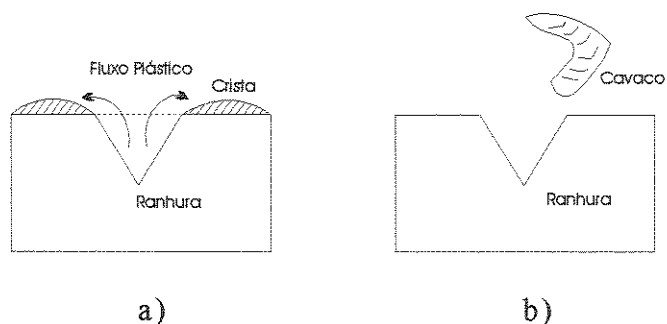


Figura Representação esquemática dos processos de formação de ranhuras, a) deslocamento plástico, b) corte ou micro usinagem, segundo KHRUSHOV & BABICHEV (1987).

Na figura estão representados os dois mecanismos básicos:

- a) formação de ranhuras por deformação plástica, não havendo remoção de material e;
- b) formação de ranhuras por micro usinagem da superfície de menor dureza, pela partícula abrasiva dura.

No trabalho de tese de doutorado de CRNKOVICK (1993), mostram-se os diferentes pesquisadores que estudam estes mecanismos, muitos deles conseguem identificar até quatro mecanismos de abrasão: deslocamento, corte, cunha e escamas. Neste trabalho apenas se fará menção de alguns mecanismos e fatores que influenciam o desgaste abrasivo, não se pretendendo um estudo aprofundado no assunto.

B) Fatores que Influenciam o Desgaste Abrasivo

Como mencionado anteriormente, CRNKOVIC (1993), faz uma explicação bem detalhada em suas referências bibliográficas, sobre os fatores que influenciam o desgaste abrasivo:

1. dureza do abrasivo;
2. dureza do material;
3. velocidade de deslizamento;
4. carga;
5. percurso do deslizamento;
6. calor de atrito;
7. tamanho da partícula abrasiva;
8. forma da partícula abrasiva;
9. rugosidade superficial;
10. estrutura cristalina;
11. microestrutura;
12. deformação a frio;
13. tamanho do corpo de prova e;
14. umidade.

Não existe um consenso quanto à quantidade de fatores que influenciam no desgaste abrasivo, sendo este tópico tema de trabalhos de inúmeros pesquisadores que comprovaram alguns fatores que encontram-se referenciados no trabalho de, CRNKOVIC (1993).

A seguir, apresenta-se um resumo de cada um desses fatores.

Dureza do Abrasivo: determinaram que o desgaste abrasivo depende da relação entre a dureza do abrasivo e a dureza do metal. Concluindo que para

reduzir o desgaste abrasivo, a dureza do metal deve ser maior que a do abrasivo de cerca de 30%.

Dureza do Material: uma das conclusões é que para materiais metálicos endurecidos a frio, por deformação plástica, a resistência relativa ao desgaste abrasivo, não depende da dureza resultante do trabalho de deformação. Outro pesquisador concluiu que a resistência a abrasão aumenta em função do conteúdo de Carbono, sendo maior para aços de alto Carbono e mesma dureza.

Velocidade de Deslizamento: vários pesquisadores determinaram experimentalmente que o volume de material removido por desgaste abrasivo, aumenta devido à elevação do calor de atrito com o aumento da velocidade, mas nenhuma evidência do aquecimento sobre a superfície de atrito foi descoberta, afirmam os pesquisadores.

Carga: mostraram que o volume removido por desgaste abrasivo é diretamente proporcional à carga nominal.

Percurso de deslizamento: obtiveram uma parte não linear entre o peso perdido por desgaste e o percurso de deslizamento para curtas distâncias de deslizamento, até que o equilíbrio seja alcançado, que depende da dureza relativa do abrasivo e do material.

Calor de Atrito: os autores concluem que baixas velocidades, assim como mudanças devido ao calor gerado pelo deslizamento têm pouca influência sobre a taxa de desgaste.

Tamanho da Partícula Abrasiva: estabeleceram, entre algumas teorias, que o tamanho da partícula abrasiva tem um significativo efeito sobre o volume removido por desgaste abrasivo. Quando a carga por unidade de área é constante, o volume de material removido aumenta quando o tamanho da partícula abrasiva aumenta até um determinado tamanho, além do qual terá pouca influência.

Forma da Partícula Abrasiva: resultado de outros pesquisadores, descrevem que partículas abrasivas angulares de baixa dureza produzem maior desgaste abrasivo do que partículas abrasivas de formas arredondadas.

Rugosidade Superficial: prognosticam que a taxa de desgaste abrasivo volumétrico para os metais hexagonais, gira em torno da metade daquela apresentada pelos metais cúbicos, uma vez que é maior a proporção deslocada por fluxo plástico no plano (001).

Microestrutura: analisando-se a estrutura no aço 1040, com vários tratamentos de endurecimento e revenido, produzindo várias estruturas ferrítica - perlítica. Os resultados indicaram que a resistência à abrasão é proporcional à fração volumétrica da perlita.

Deformação a Frio: determinaram experimentalmente que a deformação plástica a frio não influencia a resistência ao desgaste abrasivo.

Tamanho do Corpo de Prova: variaram os tamanhos das amostras ensaiadas contra um mesmo tipo de lixa, determinaram diferenças acima de 30% nos resultados de desgaste.

Umidade: concluíram que o efeito da umidade sobre a taxa de desgaste abrasivo, somente torna-se importante em baixas taxas de desgaste.

Todas estas conclusões estão detalhadas no trabalho de CRNKOVIK (1993), com suas referências bibliográficas.

Apêndice III- Fundamentos Teóricos sobre Expansão Térmica

Por fundamentos da Física o estudo da expansão ou dilatação, como alguns autores colocam, realiza-se analisando separadamente os três tipos de dilatações que se produzem:

- a) expansão linear
- b) expansão superficial
- c) expansão volumétrica

Na expansão linear, considera-se o aumento de uma dimensão, como, por exemplo, o comprimento no caso de uma barra. Isto não quer dizer que sua seção e seu volume também aumentam. Não entanto, na barra, o comprimento é a dimensão predominante e sofre maior expansão.

A variação de comprimento, definido como (ΔL) de uma barra ao ser aquecida é diretamente proporcional a seu comprimento inicial (L_0) e também à variação de temperatura (Δt), obtendo a expressão que constitui a lei da expansão linear:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta t$$

$\alpha \Rightarrow$ *coeficiente de expansão linear*

O coeficiente de expansão linear (α) é característico de cada material e a unidade deste é o inverso do grau Celsius, chamado grau recíproco e cujo símbolo é $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Seu valor quanto maior seja, quer dizer que o material analisado mais se expande, os metais são considerados entre a substâncias que mais se dilatam. Outros materiais, como o vidro *Pyrex* e as cerâmicas apresentam pequeno coeficiente de expansão e, portanto, reduzida dilatação.

Para as expansões superficiais e volumétricas cumpre-se a lei de dilatação antes dita, sofrendo um aumento ΔA e ΔV , respectivamente. Suas expressões são:

$$\Delta A = \beta A_o \Delta t$$

$\beta \Rightarrow$ *coeficiente de expansão superficial*

$$\Delta V = \gamma V_o \Delta t$$

$\gamma \Rightarrow$ *coeficiente de expansão volumétrica*

As unidades dos coeficientes é a mesma do coeficiente de expansão linear $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Onde seus valores é aproximadamente o duplo e o triplo do coeficiente de expansão linear α .

$$\beta = 2\alpha$$

$$\gamma = 3\alpha$$

Neste trabalho analisou-se somente o fator α de cada compósito e do Alumínio, obtido pelas mesmas condições que os compósitos Al-NbC.

Para compreender melhor como o fenômeno de expansão, GONÇALVES (1973), faz uma análise em termos da curva de energia potencial, apresentados a seguir.

Considera um par de átomos ligados no sólido. A energia potencial, $V(r)$, desse dois átomos varia com sua separação, r , e pode ser representada por:

$$V(r) = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}$$

onde a , b , m e n são constantes positivas. O primeiro termo do segundo membro decorre da atração entre dois átomos (diminuindo r abaixa a energia), o segundo termo decorre da repulsão. Estes dois termos são mostrados com linhas pontilhadas na figura A, e a energia potencial total por uma linha cheia. A forma assimétrica da curva da energia potencial pode ser notada. O grau de

assimetria é uma função dos valores dos expoentes m e n na equação anterior; m é sempre menor que n . Nos cristais iônicos $m \approx 1$ e $n \approx 12$. Nos cristais moleculares, $m \approx 6$. Observe-se na figura A que para $m=1$ corresponde à atração coulombiana entre duas cargas pontuais.

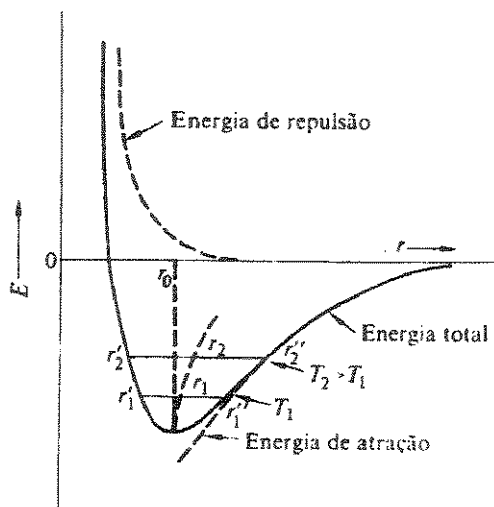


Figura A: Energia potencial x distância interatômica, segundo GONÇALVES (1973).

A forma assimétrica da curva de energia potencial, que resulta na natureza anarmônica das vibrações da rede, é responsável pela expansão térmica.

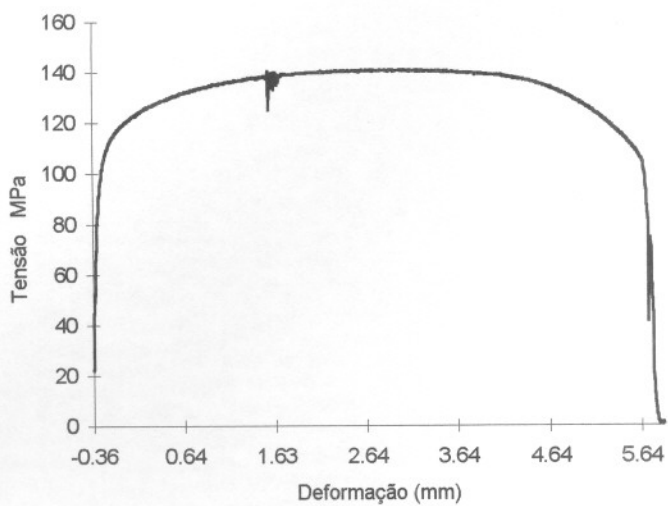
Uma grande energia de ligação leva ao alto ponto de fusão de um material, isto é, resulta num profundo mínimo de energia potencial será muito pouco assimétrica. Assim, um material com alto ponto de fusão (T_m , °C) exhibe, à temperatura ambiente, um baixo coeficiente de expansão térmica (α), segundo GONÇALVES (1973).

Apêndice IV- Resultados dos Ensaio de Tração-Gráficos Tensão x Deformação

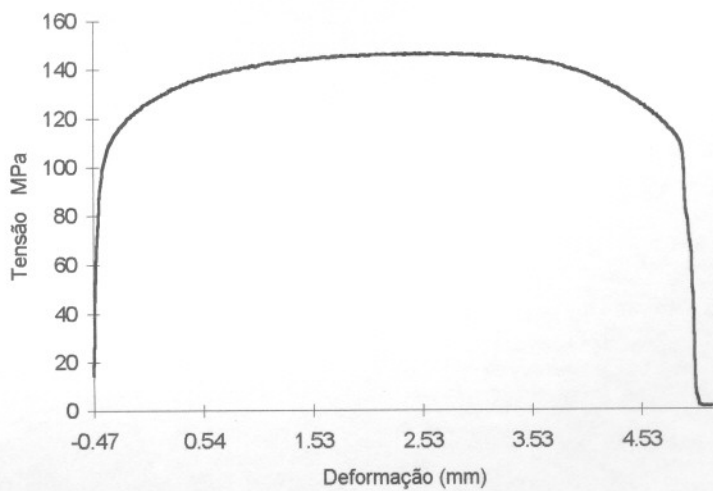
Gráficos tensão x deformação dos diferentes corpos de prova dos compósitos ensaiados.

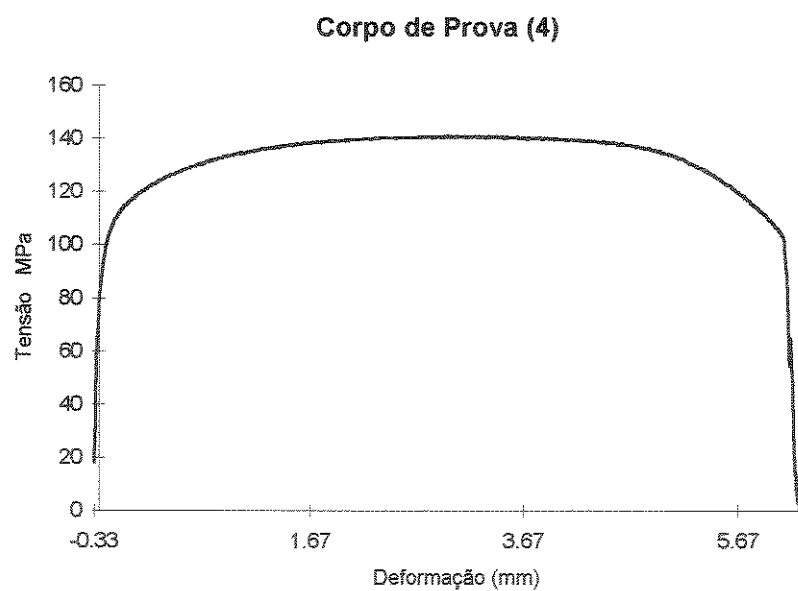
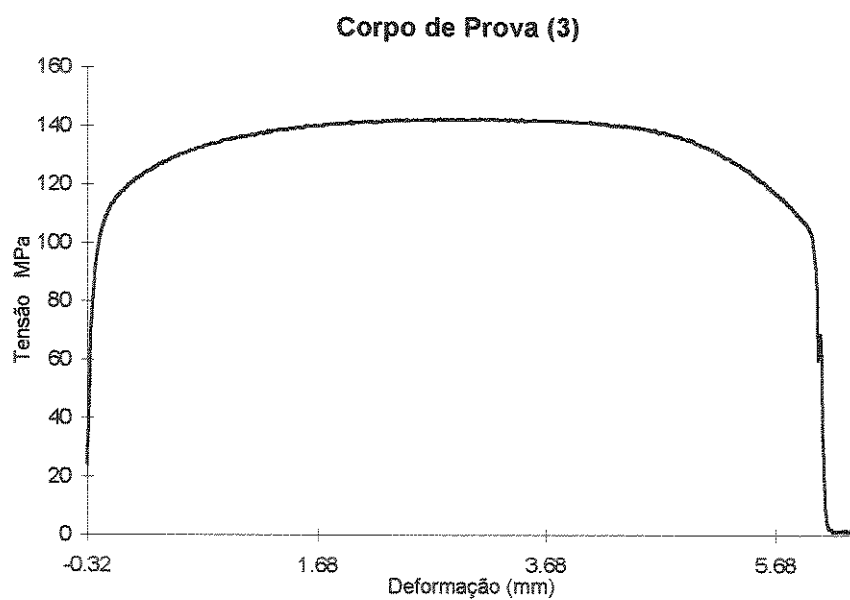
A) Compósito Al-NbC 5% vol, gráficos de 4 corpos de provas.

Corpo de Prova (1)

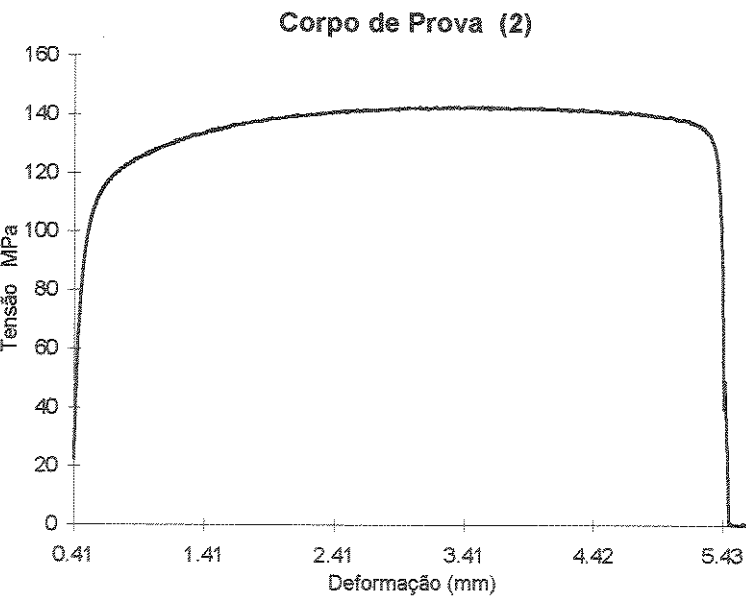
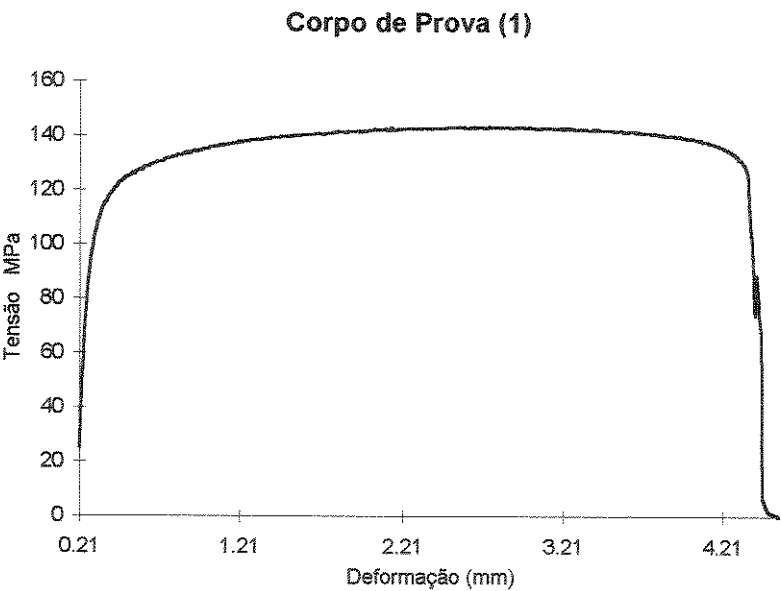


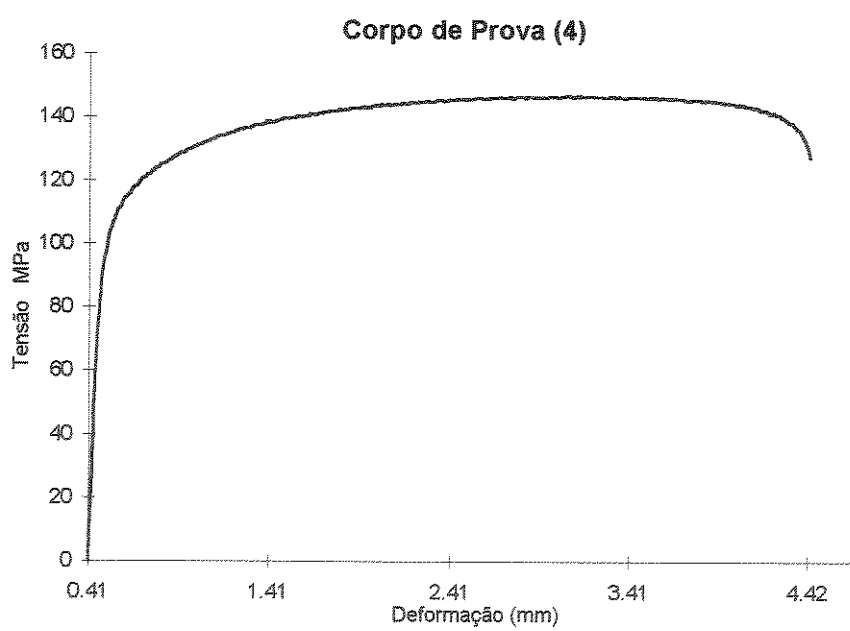
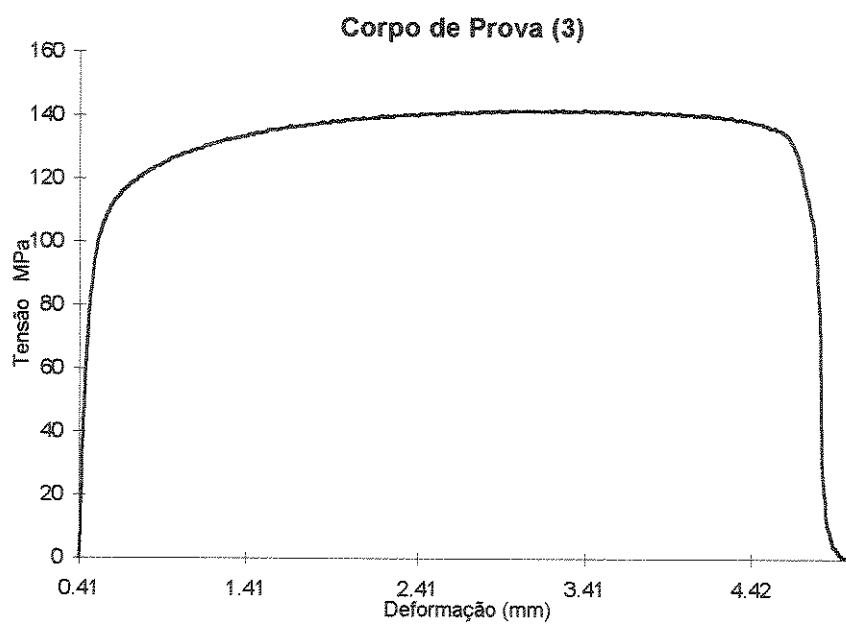
Corpo de Prova (2)



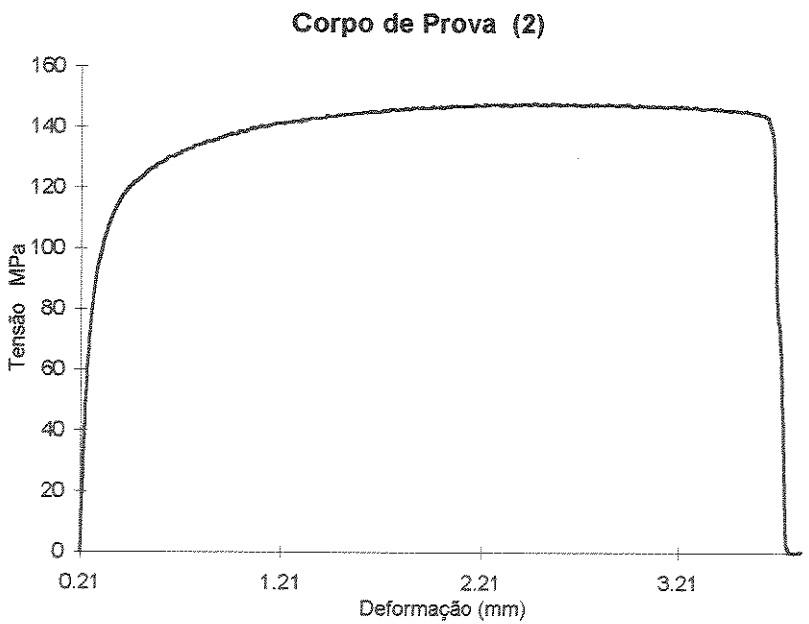
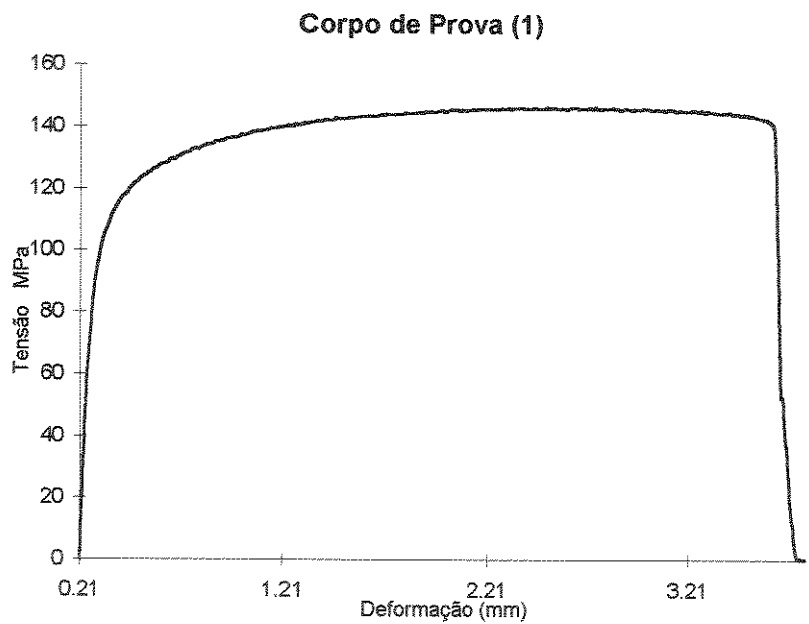


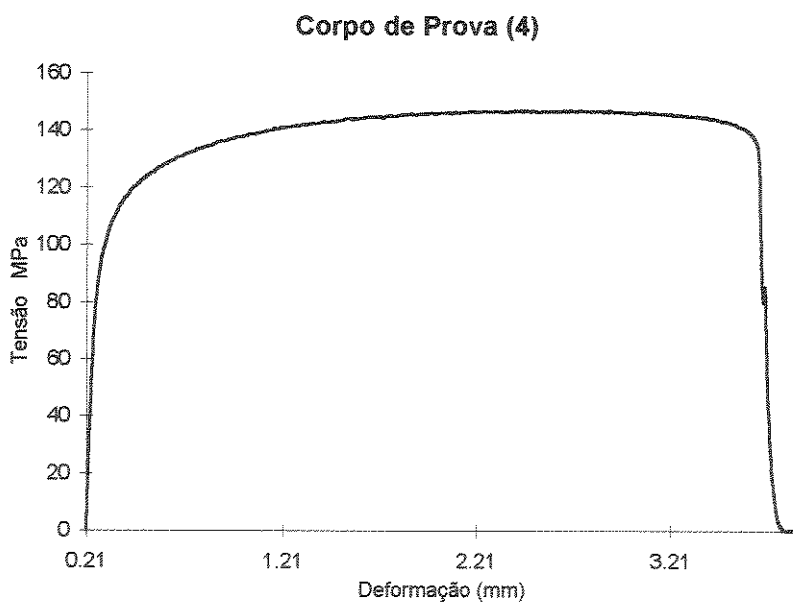
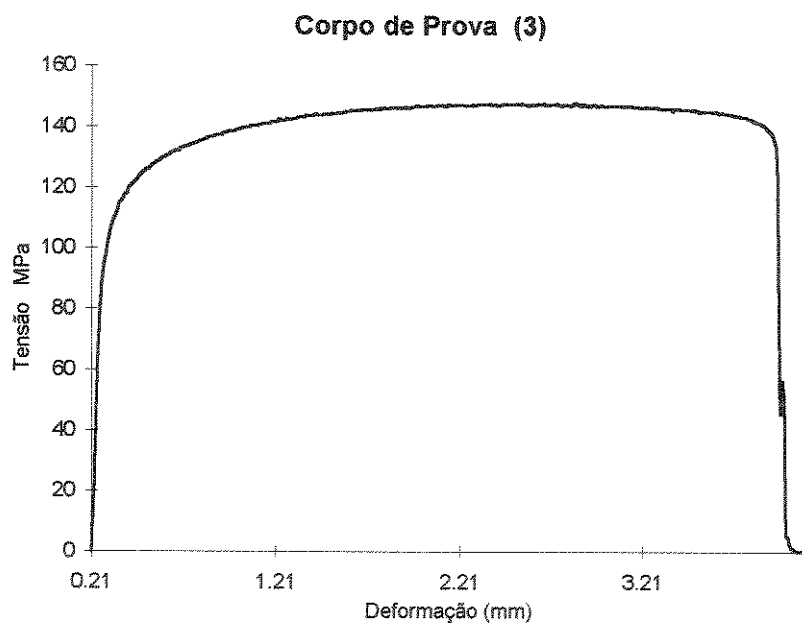
B) Compósito Al-NbC 10% vol, gráficos de 4 corpos de provas.





C) Compósito Al-NbC 15% vol, gráficos de 4 corpos de provas.





Apêndice V- Resultados dos Ensaio de Tração-Tabelas

Tabela V.1- Compósito Al-NbC (5% vol)

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
LR	140,84	146,30	142,61	141,14
LE	117,90	117,60	118,60	118,40
A	26,60	24,00	29,50	29,00
Z	28,36	28,36	30,85	29,85

Tabela V.2- Compósito Al-NbC (10% vol)

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
LR (MPa)	143,36	142,50	141,69	146,76
LE (MPa)	98,00	93,50	91,00	119,00
A (%)	20,00	22,40	20,30	19,20
Z (%)	9,45	7,96	8,96	10,95

Tabela V.3- Compósito Al-NbC (15% vol)

	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4
LR (MPa)	146,32	147,93	147,54	147,13
LE (MPa)	98,70	102,20	98,10	100,10
A (%)	15,60	16,20	16,50	15,20
Z (%)	2,49	4,48	3,48	5,47

Apêndice VI- Resultados do Ensaio de Desgaste

Resultados do ensaio de resistência ao desgaste, para quatro condições diferentes dos compósitos Al-NbC (5,10,15%) e o Al: dados experimentais.

As seguintes tabelas mostram os resultados experimentais(perda de massa Δm) especificando em cada condição o tipo de material. Precisão de medida: 0,0001g.

I) Al

Condição-1 (Lixa-220 - Carga-300 g)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,5320	0,0000	3,2950	0,0000	3,4515	0,0000
90	3,4290	0,1030	3,1985	0,0965	3,3530	0,0985
180	3,2650	0,1020	3,1060	0,0925	3,2585	0,0945
270	3,1755	0,0895	3,0225	0,0835	3,1730	0,0855
360	3,0900	0,0855	2,9400	0,0825	3,0885	0,0845
450	3,0090	0,0810	2,8575	0,0825	3,0040	0,0845

Condição-2 (Lixa-320 - Carga-300 g)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,0010	0,0000	3,3245	0,0000	3,6535	0,0000
90	2,9635	0,0375	3,2725	0,052	3,6110	0,0425
180	2,9155	0,0480	3,2180	0,0545	3,5708	0,0402
270	2,8680	0,0475	3,1665	0,0515	3,5309	0,0399
360	2,8255	0,0425	3,1245	0,042	3,4911	0,0398
450	2,7925	0,0330	3,0945	0,03	3,4514	0,0397

Condição-3 (Lixa-220 - Carga-506 g)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,3255	0,0000	3,0660	0,0000	3,5425	0,0000
90	3,1680	0,1575	2,9095	0,1565	3,3865	0,1560
180	3,0165	0,1515	2,7635	0,1460	3,2370	0,1495
270	2,8645	0,1520	2,6185	0,1450	3,0890	0,1480
360	2,7265	0,1380	2,4850	0,1335	2,9554	0,1336
450	2,5905	0,1360	2,3585	0,1265	2,8243	0,1311

Condição-4 (Lixa-320 - Carga-506 g)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,3785	0,000	3,3575	0,0000	3,2455	0,0000
90	3,3070	0,0715	3,2895	0,0680	3,1745	0,0710
180	3,2205	0,0865	3,2095	0,0800	3,0880	0,0865
270	3,1595	0,0610	3,1475	0,0620	3,0260	0,0620
360	3,1140	0,0455	3,1020	0,0455	2,9805	0,0455
450	3,0795	0,0345	3,0670	0,0350	2,9455	0,0350

II) Al-NbC 5%

Condição-1 (Lixa-220 - Carga-300 g - 5%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,2050	0,0000	4,0655	0,0000	3,9005	0,0000
90	4,1345	0,0705	3,9915	0,0740	3,8280	0,0725
180	4,0725	0,0620	3,9310	0,0605	3,7550	0,0730
270	4,0150	0,0575	3,8735	0,0575	3,6955	0,0595
360	3,9600	0,0550	3,8190	0,0545	3,6350	0,0605
450	3,9065	0,0535	3,7645	0,0545	3,5825	0,0525

Condição-2 (Lixa-320 - Carga-300 g - 5%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,8035	0,0000	4,3540	0,0000	4,0350	0,0000
90	3,7690	0,0345	4,3125	0,0415	3,9955	0,0395
180	3,7250	0,0440	4,2725	0,0400	3,9550	0,0405
270	3,6850	0,0400	4,2280	0,0445	3,9125	0,0425
360	3,6465	0,0385	4,1860	0,0420	3,8715	0,0410
450	3,6165	0,0300	4,1480	0,0380	3,8365	0,0350

Condição-3 (Lixa-220 - Carga-506 g - 5%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,2890	0,0000	4,3000	0,0000	4,0900	0,0000
90	4,1665	0,1225	4,1770	0,1230	3,9675	0,1225
180	4,0480	0,1185	4,0580	0,1190	3,8490	0,1185
270	3,9475	0,1005	3,9475	0,1105	3,7390	0,1100
360	3,8515	0,0960	3,8515	0,0960	3,6430	0,0960
450	3,7535	0,0980	3,7550	0,0960	3,5450	0,0980

Condição-4 (Lixa-320 - Carga-506 g - 5%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,2570	0,0000	4,3080	0,0000	4,2900	0,0000
90	4,1770	0,0800	4,2285	0,0795	4,2100	0,0800
180	4,0985	0,0785	4,1445	0,0840	4,1315	0,0785
270	4,0300	0,0685	4,0745	0,0700	4,0615	0,0700
360	3,9665	0,0635	4,0120	0,0625	3,9990	0,0625
450	3,9140	0,0525	3,9615	0,0505	3,9475	0,0515

II) Al-NbC 10%

Condição-1 (Lixa-220 - Carga-300 g - 10%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,3820	0,0000	4,1365	0,0000	4,2140	0,0000
90	4,3200	0,0620	4,0740	0,0625	4,1520	0,0620
180	4,2825	0,0375	4,0310	0,0430	4,1110	0,0410
270	4,2570	0,0255	4,0080	0,0230	4,0875	0,0235
360	4,2375	0,0195	3,9905	0,0175	4,0695	0,0180
450	4,2240	0,0135	3,9750	0,0155	4,0555	0,0140

Condição-2 (Lixa-320 - Carga-300 g - 10%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,6235	0,0000	4,1745	0,0000	4,1845	0,0000
90	4,5910	0,0325	4,1405	0,0340	4,1505	0,0340
180	4,5845	0,0065	4,1270	0,0135	4,1395	0,0110
270	4,5820	0,0025	4,1215	0,0055	4,1355	0,0040
360	4,5790	0,0030	4,1190	0,0025	4,1330	0,0025
450	4,5775	0,0015	4,1170	0,0020	4,1315	0,0015

Condição-3 (Lixa-220 - Carga-506 g - 10%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,0610	0,0000	3,8305	0,0000	3,7710	0,0000
90	3,9510	0,1100	3,7265	0,1040	3,6660	0,1050
180	3,8830	0,0680	3,6585	0,0680	3,5980	0,0680
270	3,8175	0,0655	3,6010	0,0575	3,5330	0,0650
360	3,7770	0,0405	3,5605	0,0405	3,4930	0,0400
450	3,7545	0,0225	3,5500	0,0105	3,4775	0,0155

Condição-4 (Lixa-320 - Carga-506 g - 10%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	3,8680	0,0000	3,9290	0,0000	3,8285	0,0000
90	3,8035	0,0645	3,8650	0,0640	3,7645	0,0640
180	3,7710	0,0325	3,8230	0,0420	3,7290	0,0355
270	3,7575	0,0135	3,7915	0,0315	3,7040	0,0250
360	3,7485	0,0090	3,7790	0,0125	3,6940	0,0100
450	3,7395	0,0090	3,7690	0,0100	3,6845	0,0095

III) Al-NbC 15%

Condição-1 (Lixa-220 - Carga-300 g - 15%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,3995	0,0000	4,2830	0,0000	4,5795	0,0000
90	4,3665	0,0330	4,2425	0,0405	4,5395	0,0400
180	4,3385	0,0280	4,1690	0,0375	4,5090	0,0305
270	4,3300	0,0085	4,1515	0,0175	4,4985	0,0105
360	4,3240	0,0060	4,1435	0,0080	4,4905	0,0080
450	4,3205	0,0035	4,1405	0,0030	4,4870	0,0035

Condição-2 (Lixa-320 - Carga-300 g - 15%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,8835	0,0000	4,5185	0,0000	4,1820	0,0000
90	4,8585	0,0190	4,5010	0,0175	4,7940	0,0180
180	4,8495	0,0020	4,4960	0,0050	4,7915	0,0025
270	4,8400	0,0025	4,4945	0,0015	4,7890	0,0025
360	4,8365	0,0035	4,4910	0,0035	4,7875	0,0015
450	4,8335	0,0015	4,4895	0,0015	4,7860	0,0015

Condição-3 (Lixa-220 - Carga-506 g - 15%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,6260	0,0000	4,3790	0,0000	4,1685	0,0000
90	4,5360	0,0900	4,2955	0,0835	4,0840	0,0845
180	4,4925	0,0435	4,2660	0,0295	4,0500	0,0340
270	4,4720	0,0205	4,2500	0,0160	4,0330	0,0170
360	4,4590	0,0130	4,2390	0,0110	4,0235	0,0095
450	4,4510	0,0080	4,2290	0,0100	4,0170	0,0065

Condição-4 (Lixa-320 - Carga-506 g - 15%NbC)						
	CP-1		CP-2		CP-3	
Percurso	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)	Massa (g)	Δm (g)
0	4,5875	0,0000	4,6495	0,0000	4,7365	0,0000
90	4,5400	0,0475	4,6060	0,0435	4,6905	0,0460
180	4,4730	0,0670	4,5970	0,0090	4,6770	0,0135
270	4,4595	0,0135	4,5920	0,0050	4,6715	0,0055
360	4,4550	0,0045	4,5895	0,0025	4,6670	0,0045
450	4,4515	0,0035	4,5860	0,0035	4,6615	0,0055

Apêndice VII- Resultados experimentais de Micro e Macro dureza

Resultados dos ensaios de microdureza:

Para a Matriz de Al:

MICRODUREZA <i>Vickers</i>						
Fase	Carga (g)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d(médio)	d ²	HV
Al	10	23,74	23,87	23,80	566,67	32,7
Al	10	22,15	22,95	22,55	508,50	36,5
Al	10	23,29	23,4	23,34	544,98	34,0
Al	10	23,24	23,37	23,30	543,12	34,1
Al	10	23,75	23,65	23,70	561,69	33,0
Al	10	23,31	23,28	23,29	542,65	34,2
Al	10	23,69	23,74	23,71	562,40	33,0
Al	10	23,44	23,33	23,38	546,85	33,9
Al	10	22,85	23,11	22,98	528,08	35,1
Al	10	23,19	23,22	23,20	538,47	34,4

Valor médio: 34,1±1,0

Para o Reforço NbC:

MICRODUREZA Vickers						
Fase	Carga (g)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d(médio)	d ²	HV
NbC	20	4,62	3,42	4,02	16,16	1147,5
NbC	20	5,27	4,12	4,69	22,04	1682,5
NbC	20	5,37	7,34	6,35	40,38	918,3
NbC	20	4,69	5,83	5,26	27,66	1340,5
NbC	20	4,45	6,28	5,36	28,78	1288,5
NbC	20	4,32	4,22	4,27	18,23	1017,1
NbC	20	4,77	4,16	4,46	19,93	1860,3
NbC	20	5,12	6,35	5,73	32,89	1127,6
NbC	20	4,89	4,98	4,93	24,35	1522,9
NbC	20	4,65	5,24	4,94	24,45	1516,7

Valor médio: 1342,2±286

Resultados da macrodureza

Para o Al sem reforço:

Macrodureza (Dureza Brinell HB)				
CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
30,2	30,2	29,5	30,2	30,2
30,2	30,2	30,2	30,2	30,2
30,2	26,7	30,2	30,2	30,2
30,2	29,5	29,5	29,5	30,2
30,2	28,7	30,2	30,2	30,2

Valor médio: 29,89±0,43

Para o compósito Al-NbC (5% vol):

Macro dureza (Dureza <i>Brinell</i> HB)				
CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
35,5	35,5	36,5	34,6	35,5
36,5	35,5	36,5	35,5	35,5
35,5	34,6	36,5	36,5	35,5
36,5	33,7	35,5	34,6	35,5
35,5	33,7	35,5	35,5	35,5

Valor médio: 35,49±0,52

Para o compósito Al-NbC (10% vol):

Macro dureza (Dureza <i>Brinell</i> HB)				
CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
37,6	38,6	38,6	38,6	39,7
39,7	37,6	36,5	38,6	38,6
38,6	38,6	38,6	39,7	38,6
37,6	38,6	38,6	39,7	38,6
38,6	39,7	38,6	39,7	38,6

Valor médio: 38,66±0,37

Para o compósito Al-NbC (15% vol):

Macro dureza (Dureza <i>Brinell</i> HB)				
CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
42,2	41	42,2	42,2	42,2
42,2	42,2	42,2	42,2	42,2
43,5	42,2	41	42,2	42,2
41	42,2	41	42,2	42,2
41	42,2	42,2	42,2	42,2

Valor médio: 42,01±0,18

Apêndice VIII- Resultados Experimentais de Expansão Térmica

Para o Al sem reforço:

Corpos de Prova	$\alpha * 10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$
1	34,9
2	33,6
3	34,2
4	33,9
Valor médio: $33,9\pm0,10$	

Para o compósito Al-NbC (5% vol):

Corpos de Prova	$\alpha * 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$
1	28,34
2	27,98
3	28,21
4	28,03
Valor médio: $28,19\pm0,19$	

Para o compósito Al-NbC (10% vol):

Corpos de Prova	$\alpha * 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$
1	27,40
2	27,10
3	28,01
4	27,09
Valor médio: $27,33 \pm 0,36$	

Para o compósito Al-NbC (15% vol):

Corpos de Prova	$\alpha * 10^{-6} \text{ (1/}^{\circ}\text{C)}$
1	24,80
2	25,03
3	25,10
4	25,04
Valor médio: 25,20±0,43	

Apêndice IX- Resultados Experimentais de Densidade Aparente

Para o Al sem reforço:

Corpos de Prova	Densidade (g/cm ³)	
1	2,6395	
2	2,6004	
3	2,6750	
4	2,6113	
5	2,6838	
6	2,6644	
7	2,6492	
8	2,6880	
9	2,6004	
10	2,6750	
11	2,6113	
12	2,6838	
13	2,6644	
14	2,6838	Valor médio
15	2,6644	2,65±0,03

Para o compósito Al-NbC (5% vol)

Corpos de Prova	Densidade (g/cm ³)	
1	3,2097	
2	3,1579	
3	2,8409	
4	2,6024	
5	3,1815	
6	2,8220	
7	3,1391	
8	3,2857	
9	3,2934	
10	3,0762	
11	3,0425	
12	2,9986	
13	2,9506	
14	3,3098	Valor médio
15	2,9378	3,06±0,20

Para o compósito Al-NbC (10% vol)

Corpos de Prova	Densidade (g/cm ³)	
1	3,1394	
2	3,1437	
3	3,1256	
4	3,1443	
5	3,1420	
6	3,1450	
7	3,1383	
8	3,1486	
9	3,1202	
10	3,1446	
11	3,1417	
12	3,1267	
13	3,1289	
14	3,1435	Valor médio
15	3,1310	3,14±0,01

Para o compósito Al-NbC (15% vol)

Corpos de Prova	Densidade (g/cm ³)	
1	3,0568	
2	3,0521	
3	3,4127	
4	3,7040	
5	3,0416	
6	3,4729	
7	3,0982	
8	2,9447	
9	2,9693	
10	3,1616	
11	3,2038	
12	3,2196	
13	3,2865	
14	2,9469	Valor médio
15	3,3444	3,20±0,22