

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PMT-594 - *Trabalho de Formatura II*



**Influência do Lubrificante na Resistência a
Verde e Resistência do Sinterizado de Pó de
Ferro Trifer DS 205**

Mauro Cezar Miskulin

Orientador: Prof. Dr. Cyro Takano

Coorientador: Eng. Ronaldo Pegorer

Dezembro de 1997

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Cyro Takano pela orientação.

À Metal Leve S. A. Indústria e Comércio e Metal Leve Produtos Sinterizados pela oportunidade de realizar este trabalho.

A todos os funcionários destas empresas que auxiliaram e orientaram a realização do mesmo.

À Antonio Weber Miskulin pela revisão do texto e pela sua influência quanto ao estudo da metalurgia.

À Simone Hashimoto pelo incentivo e auxílio na digitação.

Índice

1. Objetivos e Justificativa	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Introdução	2
2.2. Caracterização dos Pós	3
2.2.1. Pureza e Composição Química	4
2.2.2. Microestrutura da Partícula	5
2.2.3. Forma e Tamanho da Partícula	6
2.2.4. Porosidade	8
2.2.5. Densidade Aparente	9
2.2.6. Escoabilidade	12
2.2.7. Superfície Específica	14
2.2.8. Compressibilidade	14
2.3. Mistura e Lubrificação	17
2.3.1. Mistura	17
2.3.2. A Lubrificação e sua Influência nas Propriedades dos Pós	19
2.3.3. Tipos de Lubrificantes	22
2.4. Compactação e Resistência a Verde	23
3. Materiais, Equipamentos e Métodos Utilizados	27
3.1. Materiais Utilizados	27
3.1.1. Pó de ferro Trifer DS 205	27
3.2. Equipamentos Utilizados	28
3.3. Procedimentos Experimentais	32
3.3.1. Retirada das Amostras	32
3.3.2. Análise Granulométrica do Pó de Ferro	33
3.3.3. Elaboração das Misturas	33
3.3.4. Ensaio de Densidade Aparente da Mistura	33
3.3.5. Ensaio de Escoabilidade da Mistura	33
3.3.6. Ensaio de Compressibilidade e Força de Extração da Mistura	34
3.3.7. Medida da Resistência a Ruptura Transversal	34
3.3.8. Sinterização	36
3.3.9. Medida da Dureza Aparente	36
5. Discussão	52
5.1. Caracterização do Pó de Ferro	52
5.2. Caracterização dos Lubrificantes	52

5.3. Reprodutibilidade dos Ensaios	53
5.4. Propriedades das Misturas	53
5.4.1. Densidade Aparente	53
5.4.2. Escoabilidade	54
5.4.3. Compressibilidade e Compactação das Misturas.....	54
5.4.4. Força de Extração	55
5.4.5. Resistência a Verde.....	55
5.4.6. Resistência do Sinterizado	55
5.4.7. Variação Volumétrica e Variação de Densidade na Sinterização.....	56
5.4.8. Dureza Aparente.....	56
5.4.9. Micrografias	57
6. Conclusão.....	58
7. Sugestões para Trabalhos Futuros	59
8. Referências Bibliográficas.....	60
Anexo 1: Caracterização do Pó de Ferro	62
Anexo 2: Caracterização dos Lubrificantes	71
Anexo 3: Compresibilidade e Força de Extração	76
Anexo 4: Compactação.....	81
Anexo 5: Resistência a Verde	94
Anexo 6: Resistência do Sinterizado e Variação Volumétrica na Sinterização.....	98
Anexo 7: Dureza do Sinterizado	104
Anexo 8: Micrografias	106

Índice de Figuras

Figura 1 - Fluxograma da metalurgia do pó tradicional	3
Figura 2 - Principais tipos e formas de partículas metálicas.....	7
Figura 3 - Vista seccional de medidor de densidade aparente e escoabilidade	9
Figura 4 - Gráfico da fração da densidade teórica de pós de mesmo tamanho de partículas em função da rugosidade e forma da partícula.....	10
Figura 5 - Efeito da adição de pó -325 mesh, em três diferentes formas de partículas, na densidade aparente de pó +325 mesh de aço inoxidável 316	10
Figura 6 - Ilustração do preenchimento dos vazios entre as partículas grandes com partículas finas e da separação das partículas ou "bridging".....	11
Figura 7 - Representação esquemática dos quatro possíveis efeitos da adição de pó fino sobre a densidade aparente.....	12
Figura 8 - Efeito da adição de pó -325 mesh, em duas diferentes formas de partículas, na escoabilidade de pó +325 mesh de aço inoxidável 316.....	13
Figura 9 - Efeito da oxidação da superfície do pó, expressa como porcentagem de peso ganho, na escoabilidade de vários pós de ferro	13
Figura 10 - Curvas densidade a verde x pressão de compactação para pó de ferro convencional (reduzido) e de alta compressibilidade (atomizado).....	16
Figura 11 - Efeito do tempo de mistura na densidade aparente de misturas de aço inoxidável 316 L com 0,75 % de diversos lubrificantes.....	17
Figura 12 - Efeito do tempo de mistura na densidade aparente de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes.....	18
Figura 13 - Efeito do tempo de mistura na pressão de ejeção de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes.....	18
Figura 14 - Efeito do tempo de mistura na resistência a verde de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes.....	19
Figura 15 - Efeito de diferentes teores de estearato de zinco na compactação a três diferentes pressões de pó de ferro esponja.....	21
Figura 16 - Efeito de adições de estearato de zinco na resistência do sinterizado de pó de ferro Ancor MH-1000 sinterizado por 40 min a 1120°C em gás exotérmico purificado	21
Figura 17 - Efeito de adições de estearato de cálcio e bário na resistência do sinterizado de pó de ferro Ancor MH-1000 sinterizado por 40 min a 1120°C em gás exotérmico purificado	21
Figura 18 - Diagrama esquemático da influência genérica do teor de lubrificante na escoabilidade, propriedades do compactado e condições de ejeção da mistura	22
Figura 19 - Estrutura química do estearato de zinco e cera amida.....	23

Figura 20 - Dependência entre resistência a verde e densidade aparente e a verde para diversos pós de ferro	24
Figura 21 - Influência da pressão de compactação na resistência a verde de pó de ferro eletrolítico.....	25
Figura 22 - Variação da resistência a verde com adição de pó de ferro Pyron (partículas irregulares) e lubrificante sobre pó de ferro Ancorsteel (partículas esféricas).....	26
Figura 23 - Variação da resistência a verde com efeito da adição combinada de pó de ferro Pyron, carbono e lubrificante sobre pó de ferro Ancorsteel	26
Figura 24 - Máquina de tração-compressão KRATOS	29
Figura 25 - Matrizes de compactação de barras e anéis	30
Figura 26 - Dispositivo de medida de resistência a verde por ruptura transversal	30
Figura 27 - Máquina de peneirar utilizada em laboratório	30
Figura 28 - Misturador tipo duplo-cone	31
Figura 29 - MEV dotado de EDS.....	31
Figura 30 - Esquema do dispositivo de medida de resistência a verde por ruptura transversal mostrando dimensões A , B e d	35
Figura 31 - Identação maior no produto sinterizado devido ao efeito de densificação na região da indentação	37
Figura 32 - Gráfico da distribuição do tamanho da partícula do pó de ferro Trifer DS 205, apresentando distribuição polimodal	39
Figura 33 - Gráfico do teor retido acumulado em função do tamanho da partícula do pó de ferro Trifer DS 205, mostrando tamanho médio de partícula (d_{50}) de aproximadamente $68 \mu\text{m}$	39
Figura 34 - Gráfico da densidade aparente média das misturas, ilustrando maior densidade aparente das misturas à base de estearato de metal (E, F, e I).....	41
Figura 35 - Gráfico da escoabilidade das misturas, apresentando menor escoabilidade das misturas com lubrificante tipo ceras (A e B), e mistura Kenolube (H) que apresenta aderência do pó ao funil de Hall	42
Figura 36 - Gráfico da compressibilidade média das misturas, mostrando aumento da compressibilidade com adição de lubrificante ao pó de ferro	43
Figura 37 - Gráfico da força de extração média das misturas, apresentando a significativa redução da pressão de extração com a adição de lubrificante.....	44
Figura 38 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Ceracer (A1) e Ceracer - controle I (A2), cujas barras atingiram a densidade desejada com pressões abaixo de 450 MPa.....	45
Figura 39 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Ceracer - controle II (A3) e Allwax (B), mostrando grande dispersão na pressão de compactação de barras da mistura B	45

Figura 40 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Caplube G (C) e Ferrolube M (D), que apresentaram pressão para compactar as barras ultrapassando 450 MPa	46
Figura 41 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas ZnSt paranaense (E), ZnSt 135 (F) e Stavisor Zinc E (I), cujas pressões de compactação das barras ultrapassaram 450 MPa	46
Figura 42 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Kenolube (H) e sem lubrificante (G). Nota-se pressão para compactar as barras acima de 470 MPa para a mistura G e abaixo de 450 MPa para H	47
Figura 43 - Gráfico da resistência a verde (RV) média para as misturas, onde verifica-se queda da RV com lubrificação e maiores valores de RV para misturas Allwax (B) e Kenolube (H)	48
Figura 44 - Gráfico da resistência média do sinterizado (RS) para as misturas, destacando maior RS das misturas Ferrolube M (D) e Kenolube (H)	49
Figura 45 - Gráfico da variação volumétrica de contração média das misturas na sinterização, mostrando menor contração para misturas com lubrificante tipo estearato de metal (misturas E, F e I)	50
Figura 46 - Gráfico da dureza média das misturas sinterizadas, destacando-se aumento de dureza promovida pela lubrificação e as misturas Ceracer (A1) e Ferrolube M (D), mais duras que as demais	51
Figura A1/1 - Partícula do pó de ferro DS 205 polida observada no MEV mostrando porosidade interna	63
Figura A1/2 - Partículas alongadas do pó de ferro DS 205 observada no MEV	63
Figura A1/3 - Partículas alongadas do pó de ferro DS 205 observada no MEV	64
Figura A1/4 - Partícula equiaxial do pó de ferro DS 205 observada no MEV	64
Figura A1/5 - Impureza presente no pó de ferro DS 205	65
Figura A1/6 - Impureza presente no pó de ferro DS 205, possivelmente proveniente do polimento	65
Figura A1/7 - Impureza presente no pó de ferro DS 205	66
Figura A1/8 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/5	67
Figura A1/9 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/6	68
Figura A1/10 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/7	69
Figura A1/11 - Análise química (EDS) do pó de ferro DS 205	70
Figura A2/1 - Partículas do lubrificante Ceracer 126P (A)	72
Figura A2/2 - Partículas do lubrificante Allwax (B)	72
Figura A2/3 - Partículas do lubrificante Caplube G (C)	73
Figura A2/4 - Partículas do lubrificante Ferrolube M (D)	73
Figura A2/5 - Partículas do lubrificante Estearato de Zinco paranaense (E)	74

Figura A2/6 - Partículas do lubrificante Estearato de Zinco 135 (F)	74
Figura A2/7 - Partículas do lubrificante Kenolube P11(H)	75
Figura A2/8 - Partículas do lubrificante Stavinor Zinc E (I).....	75
Figura A8/1 - Aglomerado de porosidade na barra sinterizada da mistura A1, prejudicial à sua resistência; aumento 100 x; sem ataque	107
Figura A8/2 - Porosidade na barra da mistura B; aumento 100 x; sem ataque.....	107
Figura A8/5 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura C; aumento 100 x; sem ataque	108
Figura A8/4 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura D; aumento 100 x; sem ataque	108
Figura A8/5 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura E; aumento 100 x; sem ataque	109
Figura A8/6 - Porosidade na barra da mistura F; aumento 100 x; sem ataque.....	109
Figura A8/7 - Porosidade na barra da mistura G; aumento 100 x; sem ataque.....	110
Figura A8/8 - Porosidade na barra da mistura H; aumento 100 x; sem ataque.....	110
Figura A8/9 - Porosidade na barra da mistura I; aumento 100 x; sem ataque	111

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Dependência da densidade com tamanho da partícula para alguns pós de ferro	8
Tabela 2 - Densidade aparente de pós de ferro com vários tamanhos de partículas	11
Tabela 3 - Valores típicos de superfície específica de pós de ferro comerciais	14
Tabela 4 - Compressibilidade de alguns tipos de pós de ferro comerciais.....	16
Tabela 5 - Escoabilidade de diversos pós de ferro com diferentes teores de estearato de zinco.....	20
Tabela 6 - Relação entre porcentagem em peso e volumétrica de estearato de zinco na mistura Ancorsteel 1.000	20
Tabela 7: Densidade e resistência a verde para vários tipos de pós de ferro	25
Tabela 8: Efeito do lubrificante tipo estearato de metal na densidade e resistência de pó de ferro e de cobre compactados a 550 MPa.....	26
Tabela 9 - Especificação da composição química do pó de ferro Trifer DS 205.....	27
Tabela 10 - Especificação da distribuição granulométrica (ensaio ASTM B 214-92) do pó de ferro Trifer DS 205.....	28
Tabela 11 - Especificação das propriedades do pó de ferro Trifer DS 205	28
Tabela 12 - Tempo e temperatura de cada fase da sinterização	36
Tabela 13 - Atmosfera e vazão de nitrogênio no forno de sinterização	36
Tabela 14 - Resultados da análise granulométrica do pó de ferro Trifer DS 205	38
Tabela 15 - Densidade aparente das misturas	41
Tabela 16 - Escoabilidade das misturas.....	42
Tabela 17 - Compressibilidade média e força de extração média das misturas	43
Tabela 18 - Resistência a verde média das misturas	47
Tabela 19 - Resistência do sinterizado média das misturas	48
Tabela 20 - Valor médio da variação volumétrica de contração das misturas na sinterização	49
Tabela 21 - Dureza aparente média das misturas sinterizadas	50
Tabela 22 - Resultados dos ensaios para as misturas de controle (A1, A2 e A3)	53
Tabela 23 - Resultado consolidado dos ensaios realizados nas misturas	58
Tabela A3/1 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A1	77
Tabela A3/2 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A2	77
Tabela A3/3 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A3	77
Tabela A3/4 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura B	78
Tabela A3/5 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura C	78
Tabela A3/6 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura D	78
Tabela A3/7 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura E	79

Tabela A3/8 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura F	79
Tabela A3/9 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura G	79
Tabela A3/10 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura H	80
Tabela A3/11 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura I	80
Tabela A4/1 - Dados da compactação da mistura A1	83
Tabela A4/2 - Dados da compactação da mistura A2	84
Tabela A4/3 - Dados da compactação da mistura A3	85
Tabela A4/4 - Dados da compactação da mistura B	86
Tabela A4/5 - Dados da compactação da mistura C	87
Tabela A4/6 - Dados da compactação da mistura D	88
Tabela A4/7 - Dados da compactação da mistura E	89
Tabela A4/8 - Dados da compactação da mistura F	90
Tabela A4/9 - Dados da compactação da mistura G	91
Tabela A4/10 - Dados da compactação da mistura H	92
Tabela A4/11 - Dados da compactação da mistura I	93
Tabela A5/1 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A1	95
Tabela A5/2 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A2	95
Tabela A5/3 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A3	95
Tabela A5/4 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura B	95
Tabela A5/5 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura C	96
Tabela A5/6 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura D	96
Tabela A5/7 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura E	96
Tabela A5/8 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura F	96
Tabela A5/9 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura G	97
Tabela A5/10 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura H	97
Tabela A5/11 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura I	97
Tabela A6/1 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura A1	99
Tabela A6/2 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura B	100
Tabela A6/3 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura C	100
Tabela A6/4 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura D	101
Tabela A6/5 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura E	101
Tabela A6/6 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura F	102

Tabela A6/7 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura G	102
Tabela A6/8 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura H.....	103
Tabela A6/9 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura I	103
Tabela A7/1 - Dureza HB 250 - esfera 5,0 mm das amostras	105

RESUMO EXECUTIVO

O objetivo deste trabalho é aferir a influência da adição de 0,75% de diferentes lubrificantes na resistência a verde e na resistência do sinterizado do pó de ferro Trifer DS 205. Também estudou-se a sua influência na densidade aparente, escoabilidade, compressibilidade, força de extração, variação volumétrica de contração na solidificação, dureza aparente e forma e tamanho da porosidade do sinterizados das misturas. A forma e tamanho das partículas de lubrificante foram observadas para tentar justificar o comportamento das propriedades das misturas. Foram testados os seguintes lubrificantes:

A1	Ceracer	E	Estearato de Zinco paranaense
A2	Ceracer - controle I	F	Estearato de Zinco 135
A3	Ceracer - controle II	G	DS 205 sem lubrificante - referência
B	Allwax	H	Kenolube P11
C	Caplube G	I	Stavinor Zinc E
D	Ferrolube M		

O lubrificante é adicionado ao pó metálico para aumentar a vida útil da matriz pela redução do atrito entre o pó de ferro e a matriz, reduzindo o desgaste da mesma. Os lubrificantes podem ser classificados em três grupos: Estearato de Metal (E, F e I), Ceras (A e B) e Compósitos (C, D e H).

A resistência a verde (RV) é importante para peças com paredes finas ou geometrias complexas, pois indica a resistência do compactado ao trincamento durante sua ejeção e manuseio. Pós com alta RV possibilitam a obtenção de componentes mais complexos. A resistência do sinterizado é fundamental para a performance do componente em serviço.

Verificou-se que o pó de ferro Trifer DS 205 é policristalino e apresenta poucos grãos com porosidade interna. Sua distribuição granulométrica é bimodal, com tamanho médio de partícula de 68 μm . O pó contém impurezas de Al, Ti, Zr e Si.

Os lubrificantes B, D, E e F são semelhantes em forma e tamanho das partículas. O lubrificante E tem forma semelhante aos anteriores mas tamanho das partículas menor, possibilitando melhores propriedades. O lubrificante A tem partículas esféricas e maiores que as demais, o que pode causar aglomeração.

Os lubrificantes E e F apresentam as maiores densidade aparente. Em relação à escoabilidade, os melhores lubrificantes são C, D, E, F e I.

A força de extração é reduzida pelos lubrificantes. Comparação entre diferentes lubrificantes foi prejudicada pela falta de controle de velocidade de extração.

A resistência a verde (RV) é diminuída de modo significativo pela presença de lubrificante. As misturas B e H apresentam RV superior às demais.

Os lubrificantes compósitos D e H apresentaram resistência do sinterizado (RS) superior à mistura de referência (G), enquanto as demais misturas apresentaram RS menor.

Os lubrificantes compósitos (C, D e H) e do tipo cera (A e B) tiveram maior redução de volume na sinterização, com a densidade mantendo-se constante ou aumentando na sinterização. Os lubrificantes tipo estearato de metal (E, F e I) tiveram menor contração volumétrica, e sua densidade diminui na sinterização.

Quanto à dureza aparente, os melhores lubrificantes são: A1 e D.

Em termos de RS, os lubrificantes D e H são os melhores. Como o lubrificante D apresenta maior escoabilidade, densidade aparente e compressibilidade, ele foi considerado o lubrificante que, no todo, apresentou os melhores resultados. O lubrificante H apresentou-se como segunda opção, desde que problema de falta de escoabilidade seja sanado, o que pode ser feito através de uso de menores teores de lubrificantes ou de processos de mistura diferentes.

A1	Ceracer	E	Estearato de Zinco paranaense
A2	Ceracer - controle I	F	Estearato de Zinco 135
A3	Ceracer - controle II	G	DS 205 sem lubrificante - referência
B	Allwax	H	Kenolube P11
C	Caplube G	I	Stavinor Zinc E
D	Ferrolube M		

Influência do Lubrificante na Resistência a Verde e na Resistência do Sinterizado do Pó de Ferro Trifer DS 205

1. Objetivos e Justificativa

O objetivo deste trabalho é aferir a influência da adição de 0,75% de diversos lubrificantes na resistência a verde e na resistência do sinterizado do pó de ferro Trifer DS 205.

Peças que apresentam geometria complexa e/ou paredes finas, estão sujeitas a trincamento ou fratura durante sua ejeção da matriz e manuseio. Elevada resistência a verde é desejável para evitar este problema, reduzindo o custo de sucateamento de peças danificadas no estado a verde. Como os componentes produzidos por metalurgia do pó estão ficando maiores e mais complexos, a resistência a verde possui um papel cada vez mais importante na produção.

Outra vantagem de componentes com alta resistência a verde provém da possibilidade de estes passarem por sistema automático de manuseio e inspeção antes da sinterização, reduzindo o custo de inspeção e possibilitando a produção de peças mais complexas^[27].

A resistência do sinterizado é fundamental para a performance do componente em serviço.

O lubrificante é adicionado ao pó metálico para facilitar remoção do compactado da matriz, reduzir o desgaste da matriz e diminuir a pressão de compactação. Lubrificantes misturados ao pó, também chamados de lubrificantes internos, resultam em maiores custos de material e de operação (operações adicionais para retirar lubrificante), menor resistência a verde devido menor atrito entre partículas, limitação na densidade final (devido ao grande volume de lubrificante utilizado) e em menor resistência do sinterizado devido a impurezas residuais. Desse modo, o correto dimensionamento da lubrificação é muito importante.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

A metalurgia do pó é um meio de conformação mecânica que se distingue dos convencionais pela utilização de pós metálicos e não metálicos como matéria-prima; por haver uma ausência total de fase líquida (ou presença parcial, em alguns casos); por possibilitar a obtenção de peças de todos os metais e ligas e por produzir componentes próximos à sua forma final.

A metalurgia do pó apresenta uma série de vantagens que viabilizam a sua aplicação desde componentes para fechaduras até componentes de mísseis, sendo as principais:

- Apresenta recursos de produção peças complexas em formas quase definitivas, com pequenas tolerâncias dimensionais, reduzindo a necessidade de usinagem posterior;
- Viabiliza a produção e conformação de metais impossíveis ou muito difíceis de serem obtidos por processos convencionais, como metais refratários, imãs permanentes ou metal duro;
- Permite obter componentes bimetálicos ou compósitos de elementos metálicos com não-metálicos;
- Possibilita obtenção de características estruturais especiais, como porosidade controlada, utilizada em filtros metálicos e mancais auto-lubrificantes;
- Bom acabamento superficial;
- Alto aproveitamento de material (matérias-primas) pois não há rebarbas ou canais alimentadores;
- Necessita de baixo investimento de capital, que é aliado a operações automatizadas com baixo consumo de energia.

Porém, o processo é encarecido pelo elevado custo de sua matéria-prima (pós) e do ferramental utilizado (matrizes e componentes de compactação). Os fatores acima tornam a metalurgia do pó um processo de alta produtividade extremamente recomendável para peças pequenas com grandes volumes de produção, como é caso de componentes da indústria automobilística.

O estudo da metalurgia do pó refere-se ao estudo da obtenção e caracterização de pós metálicos, e seu processamento em peças ou componentes, sendo dividido em três áreas básicas.

A primeira área é a tecnologia do pó, que enfoca a obtenção, classificação, caracterização, manuseio e mistura do pó. Como pontos secundários, são abordados amostragem, segurança, embalagem e transporte

dos pós. As demais áreas referem-se ao processamento do pó, no qual este se densifica e se transforma no produto final, ocorrendo mudanças na sua forma, propriedades e estrutura. Estas áreas são: compactação e sinterização do pó.

Na figura 1, abaixo, é apresentado um fluxograma do processo de obtenção de uma peça por metalurgia do pó tradicional.

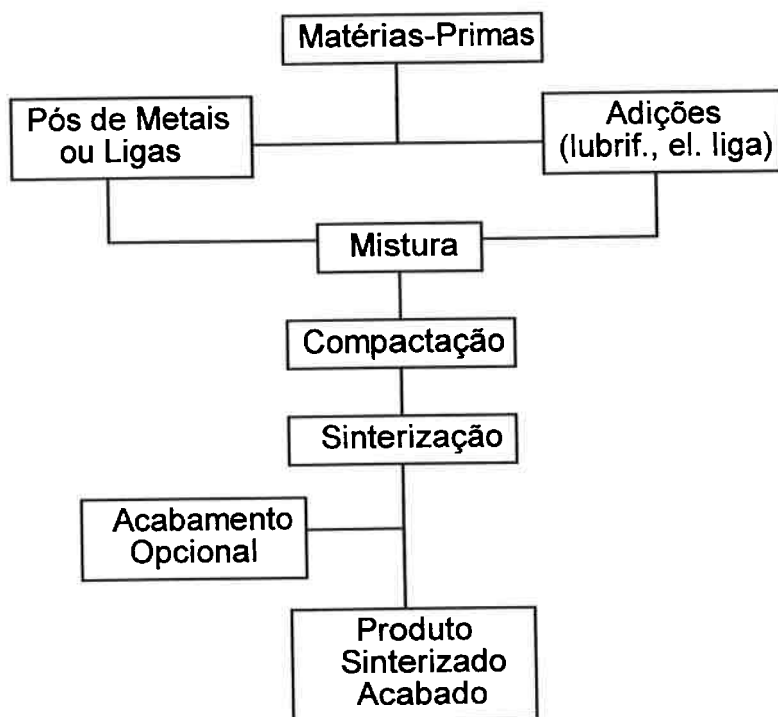


Figura 1 - Fluxograma da metalurgia do pó tradicional^[1]

2.2. Caracterização dos Pós

As principais características dos pós metálicos são:

1. Pureza e composição química;
2. Microestrutura da partícula;
3. Forma e tamanho da partícula;
4. Porosidade da partícula;
5. Densidade aparente;
6. Escoabilidade;
7. Superfície específica;
8. Compressibilidade; e
9. Resistência a verde.

2.2.1. Pureza e Composição Química

Pós de ferro elementares (sem adições) apresentam pureza acima de 99,0 ou 99,5 %^[1]; a análise da sua composição química consiste, portanto, na determinação do teor de impurezas do pó. A composição química do pó determina a sua reação às condições iniciais da compactação - especificamente, a habilidade do mesmo em se densificar. A composição exata do pó irá determinar o tipo e a extensão das reações químicas entre o compactado e a atmosfera de sinterização^[3]. Logo, as propriedades do produto final dependem grandemente da pureza do material.

A forma física da impureza é muito importante no comportamento do pó. Se o elemento estiver na forma de um composto, como cerâmicas duras, podem ser encontradas dificuldades na compactação devido à presença de uma fase abrasiva e esta fase pode permanecer inalterada durante o processamento subsequente e afetar significativamente as propriedades do produto final. Se o elemento estiver em solução sólida, seu efeito na compactação pode ser variado e reações químicas podem ocorrer na sinterização^[3].

As impurezas mais comuns nos pós de ferro são o silício, na forma de sílica ou em solução sólida, e oxigênio (principalmente quando o pó for obtido por redução), na forma de óxido de ferro^[1].

A presença de óxidos, em geral partículas cerâmicas duras, diminui a compressibilidade do pó. Deste modo, para apresentar boas propriedades mecânicas e processamento fácil, o pó de ferro deve ter baixos teores de oxigênio, o que é atingido com o recozimento do mesmo.

Para determinar aproximadamente o teor de oxigênio no pó, realiza-se o ensaio de perda por hidrogênio, no qual uma amostra de pó (usualmente 5 g) é exposta a uma atmosfera de hidrogênio seco (ponto de orvalho de - 40°C) a $1.150 \pm 15^\circ\text{C}$ por uma hora e, pela sua redução de peso, tem-se uma medida do teor de oxigênio nas formas dissolvida, de componentes orgânicos voláteis e de óxidos. Este ensaio tem uma série de limitações: certos óxidos, como sílica e alumina, não são reduzidos pelo hidrogênio a alta temperatura; a redução pode não ter se completado no tempo determinado; e elementos que reagem com o hidrogênio, como carbono e enxofre, podem contribuir para a perda de peso da amostra.

O resultado da perda pelo hidrogênio é especificado em 0,01%, podendo ser calculado pela seguinte equação:

$$\text{Perda pelo hidrogênio (\%)} = \frac{(A - B)}{(A - C)} * 100$$

onde: A = peso inicial do bote com a amostra
 B = peso do bote e da amostra após a redução pelo hidrogênio
 C = peso inicial do pó

A determinação da concentração de inclusões não-metálicas - como carbetos, sílica, silicatos, alumina e outros materiais refratários - é medida por dissolução ácida. O pó é dissolvido em ácido clorídrico, a solução é fervida, diluída e filtrada. Os resíduos são lavados e pesados. Finalmente, os resíduos e o papel de filtro são queimados a 980°C por uma hora. A diferença de peso antes e depois da inflamação é usada para calcular a quantidade de material insolúvel. A porcentagem em peso de material insolúvel no pó é obtida dividindo o peso do resíduo final pelo peso da amostra inicial.

Para alguns materiais, a dureza do pó fornece uma indicação grosseira do nível de impurezas e assegura que o pó foi recozido^[9].

2.2.2. Microestrutura da Partícula

A estrutura cristalina dos pós pode exercer grande influência sobre o seu comportamento na compactação e sinterização e nas propriedades do produto final. Duas classes de estrutura cristalina são distinguíveis: monocristalinas (tamanho de grão igual ao tamanho da partícula) e policristalinas (cada partícula contém muitos grãos).

Partículas policristalinas com tamanho de grão muito pequeno geram melhores propriedades mecânicas - tanto em direcionalidade (menor anisotropia) como em magnitude (o tamanho de grão do produto tende a ser análogo ao do grão original de pó devido à ausência de força motriz para recristalização^[4]) - e melhores características de sinterização (melhor cinética e maior uniformidade de alterações dimensionais) do que partículas monocristalinas ou policristalinas com tamanho de grão grande.

Apesar do maior limite de escoamento das partículas de pós policristalinos com tamanho de grão pequeno - que resulta em maior dificuldade na compactação, há um maior número de grãos orientados favoravelmente em relação ao estado de tensões na compactação, o que juntamente com a maior ductilidade do pó compensam esta desvantagem. Por tudo isso, pós com partículas policristalinas com tamanho de grão muito pequeno constituem a tendência atual da obtenção de pós de ferro.

2.2.3. Forma e Tamanho da Partícula

Essas são as duas características mais importantes dos pós metálicos^[1] e são intimamente relacionadas entre si, uma vez que a medida do tamanho da partícula depende do formato da mesma. A definição do tamanho da partícula é simples quando estas forem esféricas (diâmetro da partícula), mas pós com formas irregulares não podem ser definidos por um único parâmetro. Neste caso, geralmente calcula-se o diâmetro da partícula esférica equivalente a partir da medida de certas propriedades do pó.

Existem vários métodos de determinação do tamanho e da distribuição de tamanhos das partículas, entre os quais: peneiramento, microscopia, dispersão de luz (baseado em fenômenos de difração), resistividade elétrica (baseado em perturbação da condutividade elétrica de um fluido), sedimentação (baseado na velocidade de sedimentação). A composição granulométrica de pó irregulares pode variar consideravelmente de acordo com o método de medição utilizado^[3]. Este, portanto, deve ser apresentado junto com a granulometria do pó.

O peneiramento é o método mais comum pois permite determinar a composição granulométrica e preparar pós de composições diferentes. Na prática, os tamanhos de partícula dos pós metálicos variam de 0,1 a 400 microns^[1].

Uma composição granulométrica adequada é essencial para obter-se as melhores condições de operação na metalurgia do pó, ou seja as melhores propriedades de compactação, sinterização e do produto final.

A figura 2 representa os principais tipos de formas de partículas metálicas, relacionando-os ao método de produção do pó. Os pós são classificados por dois critérios: dimensionalidade da partícula e contorno da superfície da partícula.

Os pós unidimensionais são essencialmente irregulares e caracterizados pelo comprimento da sua partícula, em geral muito maior que a área transversal. Dois tipos de partículas unidimensionais podem ser considerados com base no contorno da superfície: lisa (pós aciculares) ou rugoso (pós irregulares).

As partículas bidimensionais são chatas por natureza, sendo caracterizadas pelo seu comprimento e largura. O contorno da superfície é usualmente irregular, na forma de dendritas ou escamosa.

A maioria dos pós é tridimensional, com contorno equiaxial ou nodular. A partícula mais simples e mais ideal desta categoria é a esférica. Afastando-se desta forma perfeita, estão as partículas irregulares e nodulares. As partículas porosas são diferentes das irregulares pela presença de porosidade, que pode

ser muito irregular em termos de forma e tamanho. A presença de porosidade interna em grandes quantidades torna a caracterização da forma da partícula difícil.

Entretanto, as condições mostradas na figura 2 nem sempre existem - não há uniformidade completa de formas em qualquer tipo de pó, o que resulta em dificuldades na análise da forma das partículas do pó, principalmente dos tridimensionais. Outra dificuldade pode ocorrer devido à aglomeração de partículas pequenas, exigindo a dispersão adequada das partículas para sua observação experimental.

Também na figura 2, pode ser notado que a maioria dos pós apresenta formas irregulares, o que, apesar de dificultar a compactação dos pós, é favorável à sinterização e à resistência a verde pela maior interação dos contornos das partículas e, conseqüentemente, maior atrito.

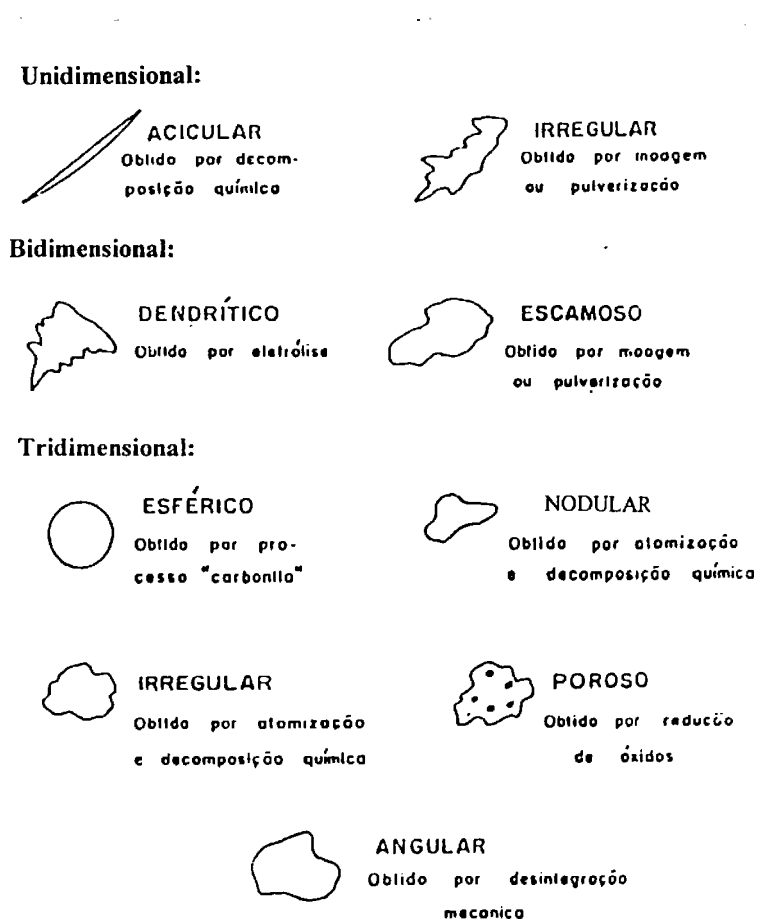


Figura 2 - Principais tipos e formas de partículas metálicas, adaptado do livro Metalurgia do Pó - Técnicas e Produtos^[1]

2.2.4. Porosidade

Algumas partículas apresentam porosidade, diminuindo a densidade aparente e a compressibilidade do pó, afetando a densidade do produto final e dificultando a obtenção de propriedades mecânicas altas, uma vez que porosidade interna do pó é de difícil eliminação no processamento posterior. A porosidade influencia grandemente a medida macroscópica de dureza de materiais obtidos por metalurgia do pó.

A porosidade pode ser do tipo esponjosa ou isolada - poros não interligados entre si - ou com poros interligados. Neste caso, se ela apresentar comunicação com a superfície, haverá um acréscimo da superfície específica das partículas e a adsorção de gases durante o processamento do pó é facilitada.

A tendência à ocorrência de porosidade aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, como mostrado na tabela 1.

A porosidade pode ser expressa através da densidade da partícula ou através da porcentagem de porosidade, calculada como:

$$\% \text{Porosidade} = 100 - \% \text{Densidade Teórica}$$

A porosidade do pó pode ser medida através do porosímetro de mercúrio ou da técnica de picnômetro. O porosímetro de mercúrio mede o volume de mercúrio infiltrado nos poros de uma amostra de pó como função da pressão aplicada, determinando o tamanho e a distribuição de tamanho dos poros.

O picnômetro determina a densidade da partícula medindo a diferença entre o volume específico e "bulk" da amostra. O método é baseado no princípio de volume deslocado, usando o pó como corpo sólido e hélio ou mercúrio como meio de deslocamento. Pode ser usado para determinar o volume total de poros, sem indicar o seu tamanho.

Tabela 1 - Dependência da densidade com tamanho da partícula para alguns pós de ferro^[4]

Tipo de Pó / Granulometria	Densidade da Partícula (g/cm³)
Eletrólítico	
Grosseira	7,85 - 7,87
Fina	7,70 - 7,85
Reduzido	
Grosseira	7,50 - 7,60
Fina	7,30 - 7,40
Carbonila	7,85 - 7,87

2.2.5. Densidade Aparente

Densidade aparente é a relação entre o volume ocupado por uma massa de pó. É obtida pelo enchimento de um recipiente de volume conhecido por uma amostra do pó. Esta é perfeitamente nivelada e pesada, obtendo-se a densidade aparente em g/cm³. Geralmente utiliza-se o funil de Hall - mostrado na figura 3 - para realizar esta medição.

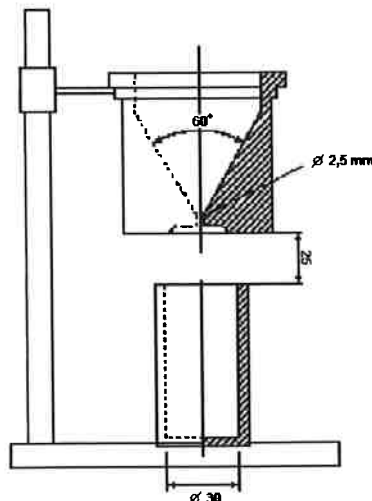


Figura 3 - Vista seccional de medidor de densidade aparente e escoabilidade^[3]

A densidade aparente é utilizada para determinar a profundidade da cavidade da matriz de compactação e o comprimento do curso da prensa necessários para compactar e densificar o pó solto. Ela afeta também os equipamentos utilizados para transportar e tratar o pó, além de influenciar indiretamente a sinterização.

A densidade aparente depende de uma série de fatores: densidade, granulometria, forma e rugosidade das partículas e superfície específica do material.

A densidade aparente dos pós varia tipicamente entre 30 e 60 % da densidade teórica do material; os valores mais baixos representam pós esponjosos irregulares.

À medida que a forma das partículas se afasta da esférica, i. e. aumenta a irregularidade das partículas, a densidade aparente diminui devido ao aumento da superfície de atrito e à menor uniformidade das partículas durante o acondicionamento ("packing"). Por aumentarem o atrito, o que reduz a capacidade das partículas arrumarem-se de maneira eficiente durante e após o acondicionamento, o aumento da rugosidade e superfície específica das

aumento da rugosidade e superfície específica das partículas produz efeito semelhante na densidade aparente, como observa-se nas figuras 4 e 5.

A tabela 2 mostra que a densidade aparente geralmente diminui com a redução do tamanho médio das partículas devido ao aumento da superfície específica e do atrito entre as partículas, apesar do menor tamanho dos vazios entre as partículas (interstícios). Este efeito é particularmente importante para partículas muito pequenas - menores que 20 microns^[4].

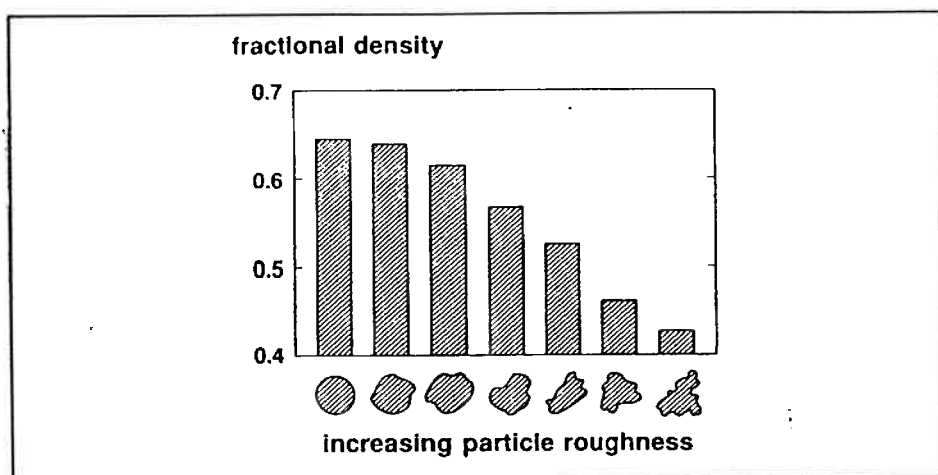


Figura 4 - Gráfico da fração da densidade teórica de pós de mesmo tamanho de partículas em função da rugosidade e forma da partícula^[9]

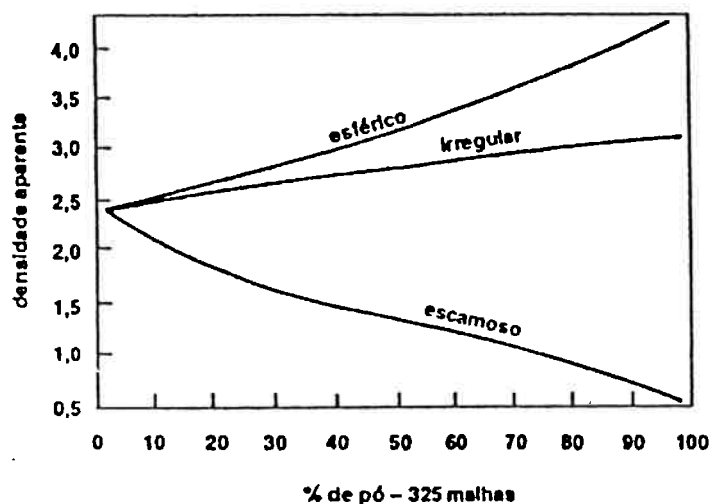


Figura 5 - Efeito da adição de pó -325 mesh, em três diferentes formas de partículas, na densidade aparente de pó +325 mesh de aço inoxidável 316^[3]

Tabela 2 - Densidade aparente de pós de ferro com vários tamanhos de partículas^[3]

Tipo de Pó	Tamanho da Partícula (microns)	Densidade Aparente (g/cm ³)
Reduzido	6	0,97
Carbonila	7	3,40
Reduzido	51	2,19
Eletrolítico	53	2,05
Eletrolítico	63	2,56
Reduzido	68	3,03
Eletrolítico	78	3,32

A distribuição granulométrica é uma característica muito importante pois um meio efetivo de aumentar a densidade aparente de um pó é preencher os interstícios deixados pelas partículas maiores com partículas menores, como ilustrado na figura 6, desde que a presença de partículas finas não seja exagerada - pode ocorrer o efeito "bridging", i. e., a formação de vazios na massa de pó, também apresentado nesta figura.

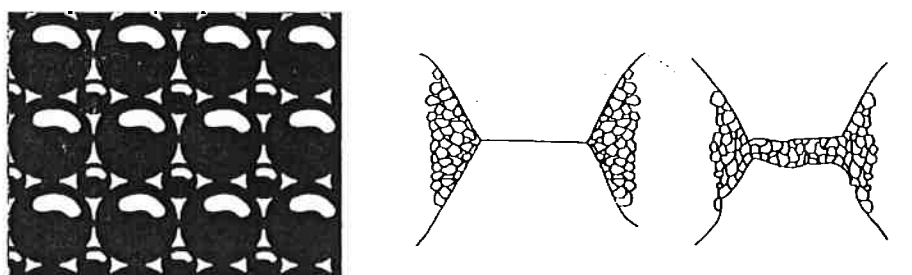


Figura 6 - Ilustração do preenchimento dos vazios entre as partículas grandes com partículas finas e da separação das partículas ou "bridging"^[26]

O aumento do teor de partículas finas no pó pode levar a quatro tipos de efeitos básicos, ilustrados na figura 7 e descritos a seguir:^[1]

1. Aumento contínuo da densidade aparente com aumento do teor de partículas mais finas devido ao preenchimento de vazios ser maior que o "bridging" ou devido a forma mais arredondada e menor rugosidade superficial das partículas finas;
2. Aumento inicial da densidade aparente seguido de decréscimo devido ao aumento do "bridging" a partir de certo teor de pó fino;
3. Queda mais acentuada da densidade aparente a partir de certo teor de partículas finas pois estas têm menor densidade que pó mais grosseiro; e

4. Queda continuada da densidade aparente com aumento do teor de pó fino como resultado de quantidade excepcional de "bridging", ausência de preenchimento de vazios e pó fino com forma ou tamanho de partícula que leva a uma densidade aparente bem inferior à do pó mais grosso.

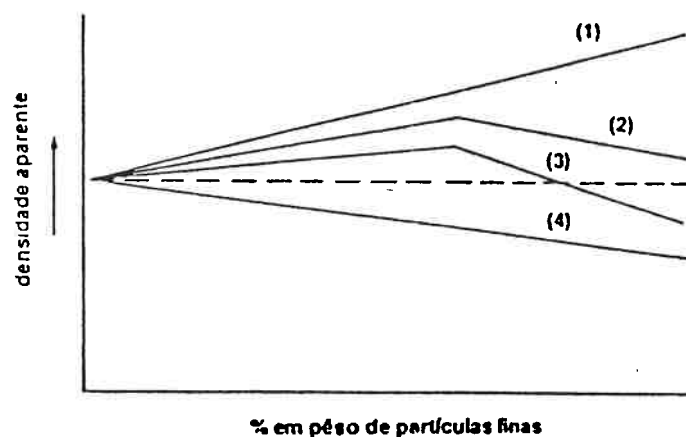


Figura 7 - Representação esquemática dos quatro possíveis efeitos da adição de pó fino sobre a densidade aparente^[1]

2.2.6. Escoabilidade

A escoabilidade é medida pelo tempo necessário para uma amostra de pó (50 g) escoar através do orifício de um funil - de material, forma e acabamento especificados (figura 3) - nas condições atmosféricas.

A resistência ao escoamento depende primariamente das regiões onde uma partícula impede a livre movimentação de outras partículas, o que é determinado, principalmente, pelo coeficiente de atrito entre as partículas do pó^[3]. Partículas podem ser impedidas de moverem-se separadamente pela aderência ou entrelaçamento temporário, formando aglomerados que ocupam volume considerável e dificultam o escoamento do pó. Portanto, a velocidade de escoamento é um fator indicativo do atrito entre as partículas do pó - tempos elevados indicam alta resistência ao escoamento e, portanto, alto coeficiente de atrito.

A escoabilidade é baixa, em geral, quando o pó apresentar uma ou mais das seguintes características^[3]: partículas irregulares ou rugosas, composição granulométrica fina (figura 8), alto coeficiente de atrito do pó, elevado teor de umidade, baixa densidade específica e baixa densidade aparente.

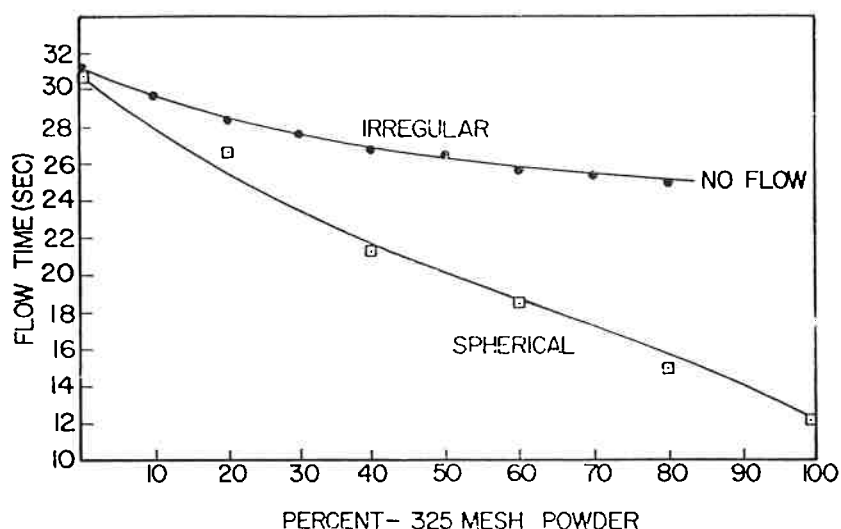


Figura 8 - Efeito da adição de pó -325 mesh, em duas diferentes formas de partículas, na escoabilidade de pó +325 mesh de aço inoxidável 316^[4]

É influenciada, também, por propriedades eletrostáticas e magnéticas do pó, bem como, pela presença de filmes de óxidos superficiais. A ocorrência de atração magnética ou eletrostática entre as partículas do pó dificulta a sua movimentação, reduzindo a escoabilidade do pó. Filmes de óxidos reduzem o atrito entre as partículas, aumentando a escoabilidade do pó, como pode ser observado na figura 9.

A importância da escoabilidade reside no fato de esta propriedade determinar o tempo e a uniformidade do enchimento da cavidade da matriz pelo pó, influenciando na produtividade e qualidade do processo^[3].

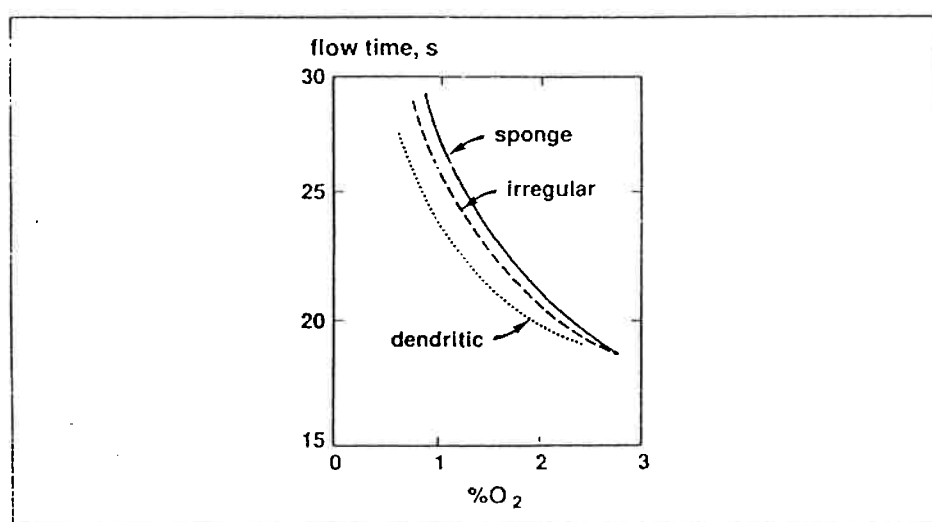


Figura 9 - Efeito da oxidação da superfície do pó, expressa como porcentagem de peso ganho, na escoabilidade de vários pós de ferro^[9]

2.2.7. Superfície Específica

Define-se pela relação entre a área superficial e o peso da partícula. A superfície específica afeta a atividade química, a compactação e a sinterização do pó - pois estas iniciam-se pela superfície do pó. A superfície específica cresce significativamente com a diminuição do tamanho, afastamento da forma esférica e aumento da rugosidade da superfície da partícula. Conseqüentemente, pós com partículas finas, irregulares e de superfície rugosa podem ter superfície específica muito alta, como pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3 - Valores típicos de superfície específica de pós de ferro comerciais^[4]

Pó, Granulometria	Superfície Específica (cm ² /g)
Reduzido	
Fina, 79% -325 mesh	5.160
Normal	1.500
Grosseira, 1% -325 mesh	516
Esponja, normal	800
Atomizado, normal	525
Eletrolítico, normal	400
Carbonila, 7 microns	3.460

Os métodos de determinação da superfície específica são: adsorção de gás e permeabilidade. A medida obtida nestes ensaios representam a média da condição externa de muitas partículas, sendo expressa em cm²/g.

No ensaio de adsorção de gás, mede-se a quantidade de gás (em geral nitrogênio) adsorvido para cobertura monomolecular do pó com gás e calcula-se a área da superfície. Pode-se calcular também o volume e a distribuição de tamanho dos poros.

No ensaio de permeabilidade mede-se a resistência de um fluido a fluir através do leito de pó compactado e calcula-se o tamanho médio da partícula e a superfície específica.

2.2.8. Compressibilidade

É o termo usado para descrever quanto uma massa de pó pode ser densificada pela aplicação de pressão, sendo expressa na forma de densidade a verde (do compactado). É o principal fator no design das ferramentas de compactação, determinando a densidade atingível do componente e a capacidade da prensa necessária para atingir esta densidade ou, para uma dada prensa, a compressibilidade determina o máximo tamanho do compactado que pode ser produzido.

A compressibilidade é dependente de uma série de fatores:^[3]

- pressão de compactação - ver figura 10;
- densidade aparente do pó - diretamente proporcional à compressibilidade, como pode ser visto na tabela 4;
- dureza e encruamento do metal ou liga - materiais duros ou com alta taxa de encruamento têm menor compressibilidade;
- porosidade interna das partículas - ar retido nos poros prejudica a compactação e apresenta baixa densidade;
- composição granulométrica do pó - misturas de tamanhos de partícula têm maior compressibilidade que pós uniformes;
- presença de não-metálicos e elementos de liga - não-metálicos como óxidos (em geral são duros e frágeis), grafite e lubrificante (baixo peso e grande volume ocupado) reduzem a compressibilidade; e
- coeficiente de atrito e regularidade das formas das partículas - pós com baixo atrito e partículas regulares têm maior densidade aparente e maior compressibilidade.

A compressibilidade pode ser definida como a densidade a verde obtida para a pressão de compactação de 30 tsi ("tons per square inch") ou 4,2 tf/cm², o que é de valor limitado pois a dependência da densidade a verde com a pressão de compactação não é linear e as diferenças relativas entre o comportamento de diferentes pós podem levar a conclusões errôneas a outras pressões. Outra abordagem pode ser o levantamento da curva densidade a verde x pressão de compactação, como mostrado na figura 10, que apresenta esta curva para dois tipos de pós de ferro: convencional e de alta compressibilidade. Nota-se que quanto maior a pressão de compactação, menor a densificação para um certo aumento na pressão.

A compressibilidade pode ser expressa também pela relação de compressão (C_R) - relação entre densidade a verde e a densidade aparente do pó ou volume do pó solto e volume do pó compactado- ou pelo parâmetro de densificação (PD), definido como:

$$PD = \frac{\text{Densidade a verde} - \text{Densidade aparente}}{\text{Densidade teórica} - \text{Densidade aparente}}$$

Este parâmetro representa a fração da densificação atingida com relação à máxima possível. São apresentados alguns dados de compressibilidade de pós de ferro comerciais na tabela 4. O primeiro grupo de materiais representam pós convencionais e o segundo, pós de alta compressibilidade.

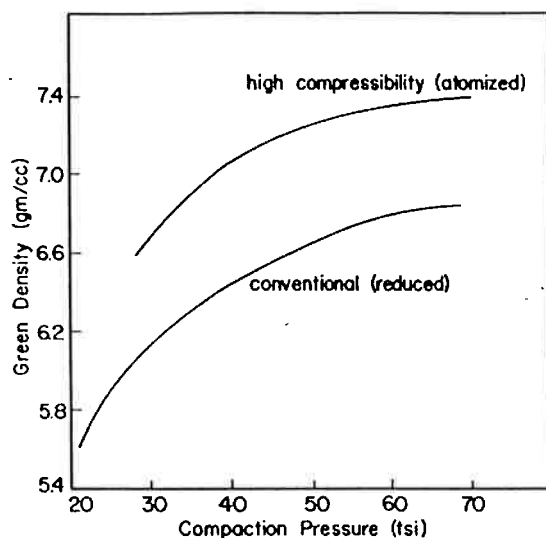


Figura 10 - Curvas densidade a verde x pressão de compactação para pó de ferro convencional (reduzido) e de alta compressibilidade (atomizado)^[4]

Tabela 4 - Compressibilidade de alguns tipos de pós de ferro comerciais^[1]

Tipo de Pó	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade a verde a 4,2 tf/cm ² (g/cm ³)	Parâmetro de Densificação	Relação de Compressão
Reduzido	2,35	6,10	0,679	2.60
Reduzido	2,35	6,35	0,725	2.70
Esponja	2,40	6,20	0,695	2.58
Atomizado/Reduzido	2,45	6,45	0,738	2.63
Esponja/Atomizado	2,47	6,55	0,755	2.65
Reduzido	2,50	6,50	0,745	2.60
Esponja	2,60	6,60	0,759	2.54
Atomizado	2,90	6,70	0,764	2.31

A relação de compressão determina quão profunda deve ser a matriz para receber todo o pó necessário para atingir a densidade especificada do componente. Uma relação de compressão baixa é desejável pois o tamanho da cavidade da matriz e da ferramenta podem ser reduzidos, levando a três efeitos benéficos: (a) redução do desgaste e quebras do ferramental, (b) movimentos da prensa podem ser reduzidos, e (c) o enchimento da cavidade é mais rápido, possibilitando maior produtividade.

2.3. Mistura e Lubrificação

2.3.1. Mistura

A operação de mistura tem como objetivos adicionar o lubrificante e os elementos de liga e homogeneizar o pó de ferro - eliminando segregação induzida pelo transporte e armazenamento do pó, que pode gerar variações de densidade e distorção do produto.

A mistura pode ser realizada para modificar a densidade aparente ou a escoabilidade do pó pelo fraturamento das partículas (pós frágeis), reduzindo o seu tamanho, ou pelo arredondamento das partículas e alisamento da sua superfície (pós dúcteis)^[4].

A qualidade da mistura é fundamental pois deficiências nesta operação não podem ser corrigidas posteriormente. Mistura insuficiente implica em segregação, com os seus efeitos descritos acima, enquanto mistura excessiva, além de custosa, pode causar segregação ou deformação plástica significativa das partículas do pó, endurecendo-as e reduzindo a compressibilidade.

O efeito do tempo de mistura na densidade aparente, pressão de ejeção e resistência a verde do aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes estão ilustrados nas figuras 11 a 14.

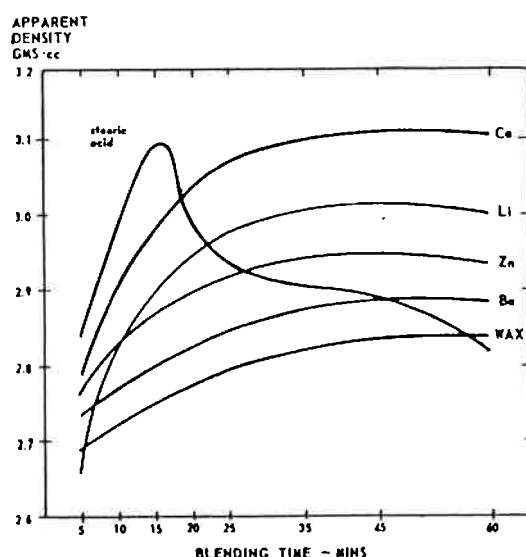


Figura 11 - Efeito do tempo de mistura na densidade aparente de misturas de aço inoxidável 316 L com 0,75 % de diversos lubrificantes^[11]

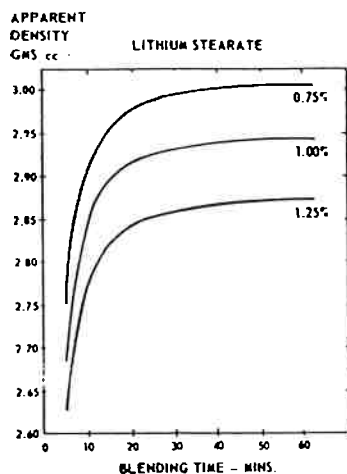


Fig. 11

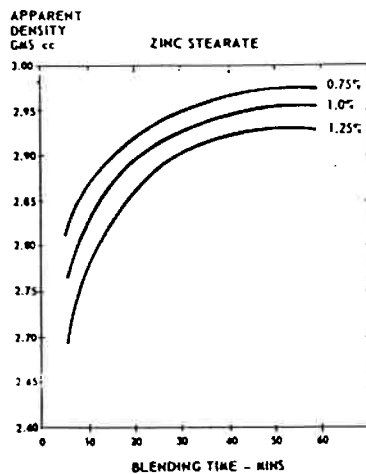


Fig. 12

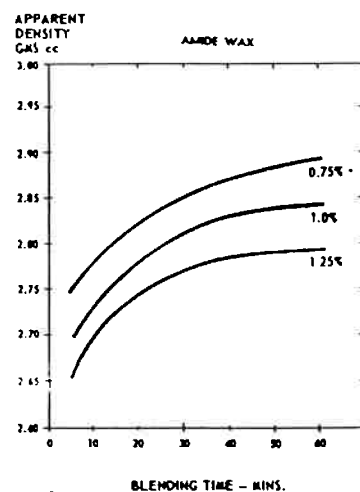


Fig. 13

Figura 12 - Efeito do tempo de mistura na densidade aparente de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes^[1]

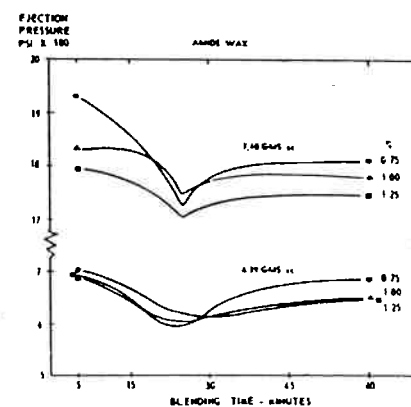
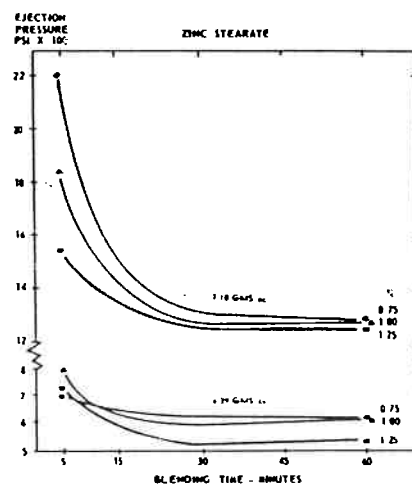
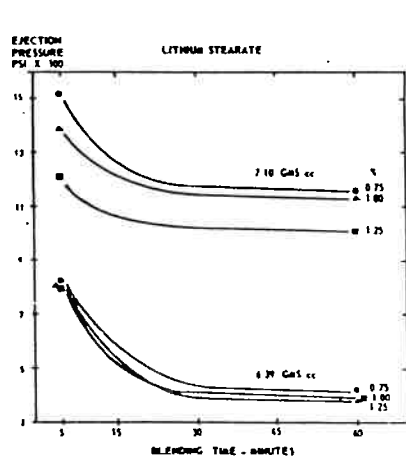


Figura 13 - Efeito do tempo de mistura na pressão de ejeção de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes^[1]

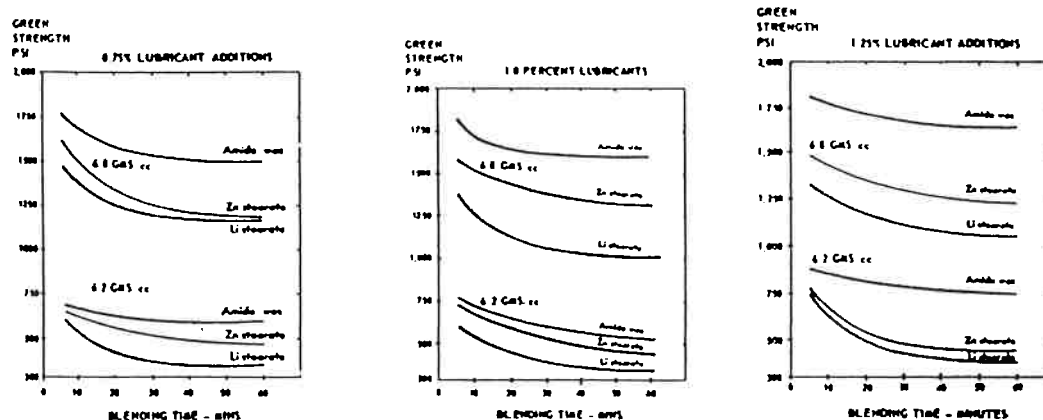


Figura 14 - Efeito do tempo de mistura na resistência a verde de misturas de aço inoxidável 316 L com vários teores de diversos lubrificantes^[11]

2.3.2. A Lubrificação e sua Influência nas Propriedades dos Pós

A principais funções do lubrificante adicionado ao pó são diminuir a pressão de compactação e facilitar a remoção do compactado da matriz, reduzindo o desgaste, aumentando a vida, e reduzindo o aquecimento da matriz.

A pressão de ejeção diminui com aumento do teor do lubrificante e redução da densidade do compactado, como mostrado na figura 13. A pressão de ejeção varia para diferentes materiais da matriz de compactação^[3] (aço ou metal duro) - fator que deve ser considerado no dimensionamento da lubrificação.

Adições mínimas de lubrificantes podem aumentar a escoabilidade do pó, mas adições maiores - como as utilizadas na prática - reduzem a escoabilidade, como pode ser visto na tabela 5. Este efeito ocorre devido ao balanço entre a redução do atrito entre as partículas (predominante para adições muito pequenas) e o grande volume ocupado pelo lubrificante (pode ser visualizado na tabela 6), que predomina para teores maiores.

Pelo mesmo balanço descrito acima, adições de lubrificante até um valor crítico aumentam a densidade aparente do pó devido à capacidade melhorada do pó assentar-se. Acima deste teor, a baixa densidade do lubrificante prepondera, diminuindo a densidade aparente da mistura. Os teores de lubrificante utilizados na prática são, geralmente, inferiores ao teor crítico.

Lubrificação é uma maneira de aumentar a compressibilidade de um pó pela redução do atrito entre as partículas e entre estas e a matriz, ou seja, redução da resistência à compactação. Há uma complexa dependência entre

teor de lubrificante, pressão de compactação e densidade a verde, mostrada na figura 15. O pico de densidade a verde é deslocado para teores menores de lubrificante à medida que a pressão de compactação é aumentada, como consequência da melhor transmissão da carga devido à lubrificação mas menor acondicionamento ("packing") devido ao volume ocupado pelo lubrificante.

A resistência do sinterizado pode variar consideravelmente de acordo com o tipo do lubrificante utilizado^[3]. Estearato de zinco e ácido esteárico causam pequena diminuição da resistência do sinterizado, enquanto estearato de bário e estearato de cálcio causam quedas grandes da resistência, como pode ser visto nas figuras 16 e 17.

A figura 18 apresenta um diagrama esquemático da influência genérica do teor de lubrificante na escoabilidade, propriedades do compactado e condições de ejeção da mistura.

Tabela 5 - Escoabilidade de diversos pós de ferro com diferentes teores de estearato de zinco^[3]

Tipo de Pó	Adição de Lubrificante (%)	Densidade Aparente (g/cm³)	Escoabilidade (s / 50 g)
MP-35 HD	isento	2.81	25.77
	0,25	3.12	23.37
	0,50	3.05	25.93
	0,75	3.02	26.80
	1,00	3.00	27.57
MH-100	isento	2.48	30.14
	0,25	2.97	23.23
	0,50	2.93	26.39
	0,75	2.86	28.97
	1,00	2.87	30.42
A-Met 1000	isento	2.94	26.24
	0,25	3.27	23.89
	0,50	2.98	28.30
	0,75	3.18	25.46
	1,00	3.18	25.58

Tabela 6 - Relação entre porcentagem em peso e volumétrica de estearato de zinco na mistura Ancorsteel 1.000^[6]

% Peso de Estearato de Zinco	% Volumétrica de Estearato de Zinco
0,25	1,77
0,50	3,49
0,75	5,16
1,00	6,78

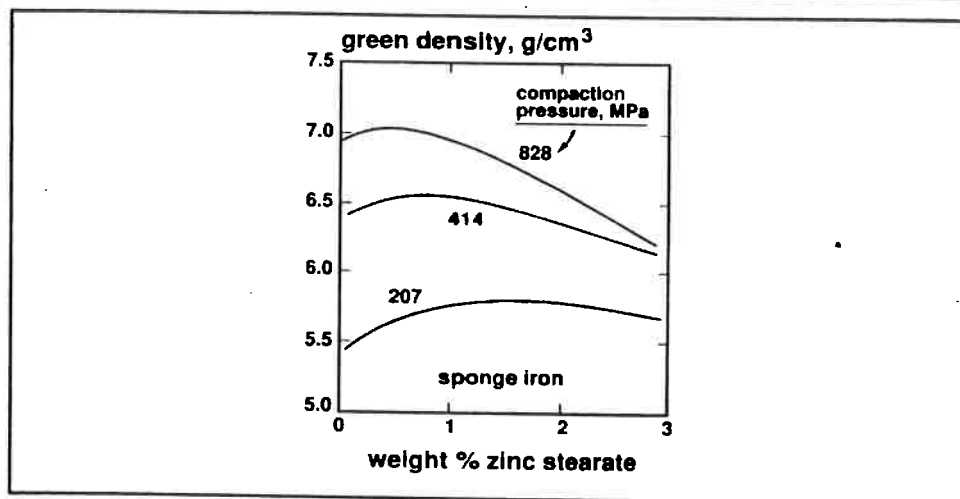


Figura 15 - Efeito de diferentes teores de estearato de zinco na compactação a três diferentes pressões de pó de ferro esponja^[11]

Preheat of 650 °C (1200 °F). Bulk density: (a) 141 kg/m³ (8.8 lb/ft³); (b) 256 kg/m³ (16.0 lb/ft³); (c) 91 kg/m³ (5.7 lb/ft³). Particle size: (a) 1.9 μm; (b) 4.5 μm; (c) 1.0 μm. Graphite addition of 0% (○) or 1.0% (●). — without lubricant. — with lubricant. Source: Ref 1

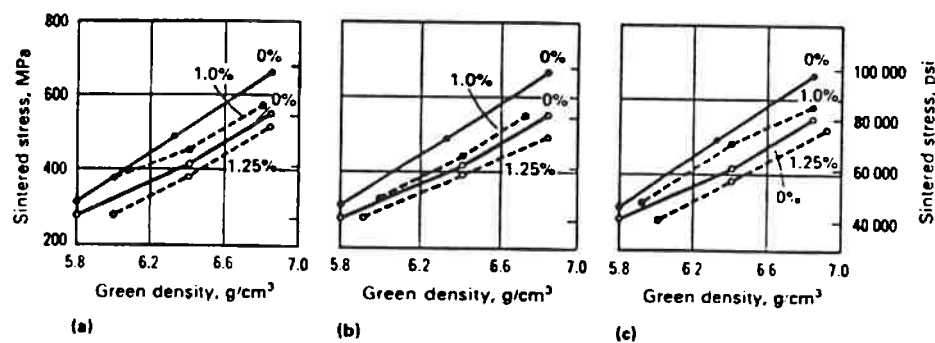


Figura 16 - Efeito de adições de estearato de zinco na resistência do sinterizado de pó de ferro Ancor MH-1000 sinterizado por 40 min a 1120°C em gás exotérmico purificado^[3]

Preheat of 650 °C (1200 °F). (a) and (b) Calcium stearate. (c) Barium stearate. Bulk density: (a) 104 kg/m³ (6.5 lb/ft³); (b) 431 kg/m³ (26.9 lb/ft³); (c) 178 kg/m³ (11.1 lb/ft³). Particle size: (a) 11 μm; (b) 18.8 μm; (c) 1.2 μm. Graphite addition of 0% (○) or 1.0% (●). — without lubricant. — with lubricant. Source: Ref 1

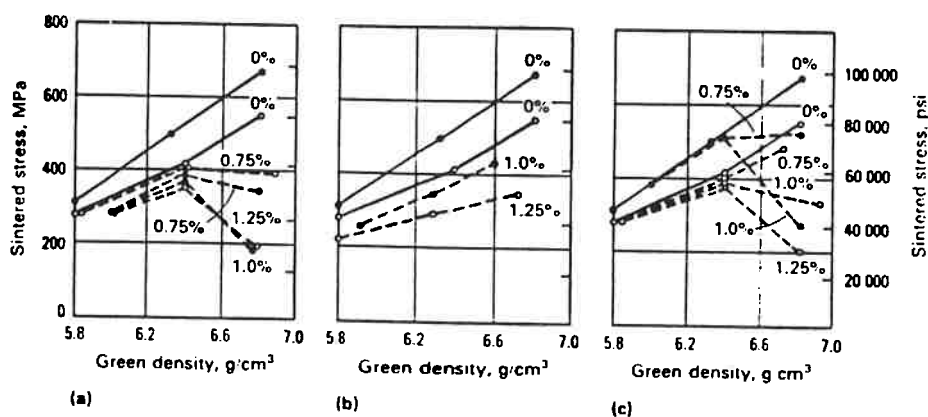


Figura 17 - Efeito de adições de estearato de cálcio e bário na resistência do sinterizado de pó de ferro Ancor MH-1000 sinterizado por 40 min a 1120°C em gás exotérmico purificado^[3]

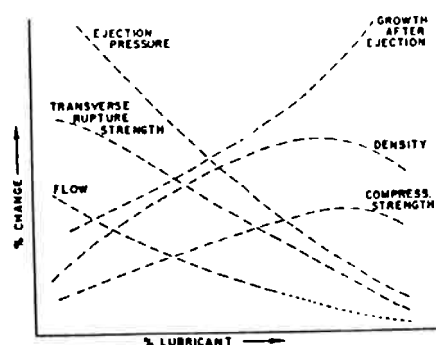


Figura 18 - Diagrama esquemático da influência genérica do teor de lubrificante na escoabilidade, propriedades do compactado e condições de ejeção da mistura^[11]

2.3.3. Tipos de Lubrificantes

Os lubrificantes podem ser divididos em três classes: estearato de metal, ceras e compósitos. Os dois primeiros consistem de um principal componente cada (com inevitáveis teores de impurezas) e o terceiro consiste em um compósito de substâncias químicas diferentes.

Os lubrificantes tipo estearato de metal são baratos em comparação com os demais e caracterizam-se por proporcionarem alta densidade aparente, alta escoabilidade, alta compressibilidade e baixa resistência a verde quando comparados com os lubrificantes tipo cera, mais caros. Entretanto, estes últimos apresentam poder lubrificante maior. A estrutura química destes tipos de lubrificantes é mostrada na figura 19.

O principal lubrificante do tipo estearato de metal é o estearato de zinco (ZnSt), que apresenta o inconveniente de depositar zinco nos componentes e fornos de sinterização e poluir a atmosfera. Os lubrificantes tipo cera apresentam como inconvenientes a menor escoabilidade e a menor compressibilidade quando comparados aos estearatos.

Os lubrificantes compósitos foram desenvolvidos com o intuito de contornar estas dificuldades e responder a demandas específicas dos produtores de componentes sinterizados. Estes lubrificantes proporcionam densidade aparente intermediária entre os dois grupos anteriores e maior resistência a verde que as ceras, com escoabilidade e compressibilidade pouco afetadas.

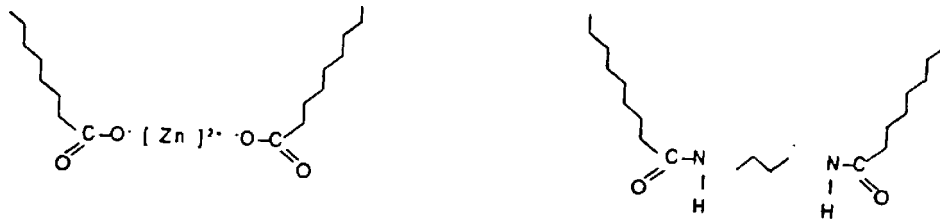


Figura 19 - Estrutura química do estearato de zinco e cera amida^[7]

2.4. Compactação e Resistência a Verde

A densidade a verde, fundamental para a resistência a verde e do sinterizado, é determinada pelos fenômenos que ocorrem durante a compactação, que podem ser resumidos da seguinte maneira: ^[1,4]

- O simples contato entre as partículas de pó já produz uma coesão, caso as partículas sejam lisas e isentas de gases absorvidos ou de películas de óxidos, que dificultam as forças de atração entre as partículas de pó, do mesmo modo que formas irregulares das superfícies de contato.
- O aglomeramento de pó metálico melhora as condições de contato, facilitando a superposição e interligação de grãos de diversas dimensões e o preenchimento dos vazios existentes entre as partículas mais grossas e mais finas.
- A aplicação de pressão aumenta as superfícies de contato entre as partículas (proporcionalmente à plasticidade do pó), diminuindo os vazios entre as várias partículas e eliminando irregularidades até certo limite.
- Ocorre, simultaneamente, aumento da coesão, da densidade e da resistência mecânica, devido à ação de atrito das partículas deslizando umas em relação às outras, criando novos pontos de contato pela eliminação das camadas de óxidos ou de películas de gases.
- Podem ocorrer aumentos localizados de temperatura devido ao atrito das partículas, provocando uma reorganização parcial dos átomos nas superfícies de contato e causando uma "soldagem" localizada.

A resistência a verde resulta, principalmente, do entrelaçamento e travamento mecânico de irregularidades da superfície das partículas, que é promovido pela deformação plástica, particularmente da superfície, durante a compactação. A resistência a verde é promovida por: ^[1,4]

- aumento da rugosidade superficial das partículas: provê mais sítios para entrelaçamento;

- aumento da área superficial do pó: equivale a aumentar as irregularidades e reduzir os tamanhos das partículas, provendo mais áreas para entrelaçamento;
- redução da densidade aparente do pó: consequência dos fatores acima;
- decréscimo da oxidação e contaminação superficial das partículas: superfície "suja" impede bom entrelaçamento das partículas;
- aumento da densidade a verde (ou pressão de compactação): promove-se maior movimentação e deformação das partículas, auxiliando a resistência;
- redução da adição de componentes moles (grafita) e lubrificantes, que impedem adequado entrelaçamento entre as partículas.

A influência da densidade aparente e a verde na resistência a verde é mostrada na figura 20. A aparente queda da resistência a verde com o aumento da densidade a verde ocorre devido à dependência entre densidade a verde e aparente. Na realidade, a resistência a verde aumenta com a densidade a verde e pressão de compactação, como pode ser visto na tabela 7 e na figura 21. Esta mostra a influência da pressão de compactação na resistência a verde, considerando-se apenas um tipo de pó de ferro.

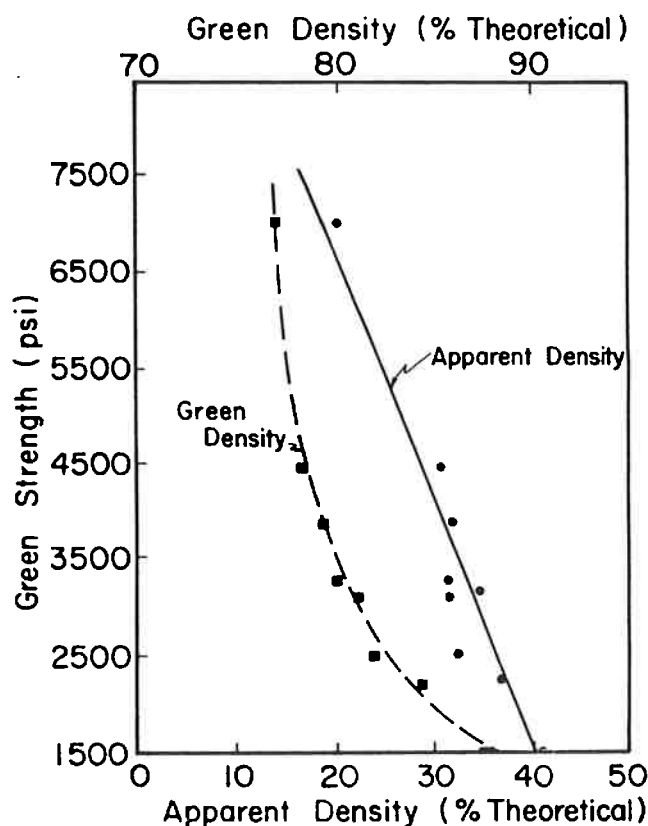


Figura 20 - Dependência entre resistência a verde e densidade aparente e a verde para diversos pós de ferro^[4]

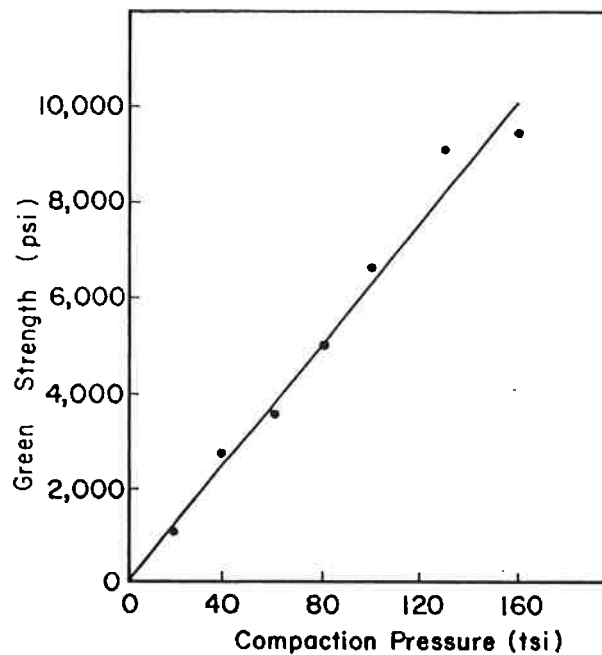


Figura 21 - Influência da pressão de compactação na resistência a verde de pó de ferro eletrolítico^[1]

Tabela 7: Densidade e resistência a verde para vários tipos de pós de ferro^[1]

Pó	Densidade Aparente (g/cm³)	Pressão de Compact. (MPa)	Densidade a Verde (g/cm³)	Resistência a Verde (MPa)
Esponja ^(a)	2,4	410	6,2	14
		550	6,6	22
		690	6,8	28
Esponja atomizado ^(b)	2,5	410	6,35	13
		550	6,80	19
		690	7,00	-
Reduzido ^(a)	2,5	410	6,5	16
		550	6,7	21
		690	6,9	24
Esponja ^(a)	2,6	410	6,6	19
		550	6,8	25
		690	7,0	27
Electrolítico ^(c)	2,6	410	6,30	32
		550	6,70	43
		690	6,95	54

(a) com 1 % de estearato de zinco
(b) com 0.75 % de estearato de zinco
(c) pó compactado isostaticamente, ao contrário dos anteriores

Pós com partículas esféricas e de tamanho uniforme apresentam a menor resistência a verde (devido à baixa superfície específica e ao pequeno número

de pontos de contato entre partículas adjacentes), enquanto pós com distribuição granulométrica e formas irregulares apresentam boa compressibilidade e resistência a verde.

A lubrificação reduz o atrito entre as partículas e entre estas e a matriz, o que leva a aumento da densidade a verde e a redução da resistência a verde, como pode ser observado na tabela 8 e figuras 22 e 23.

Tabela 8: Efeito do lubrificante tipo estearato de metal na densidade e resistência de pó de ferro e de cobre compactados a 550 MPa^[3]

Tipo de Pó	Teor Lubrificante (%)	Densidade a Verde (g/cm ³)	Resistência a Verde (MPa)
Ferro reduzido	Isento	6,47	32
	I	6,57	23
Cobre eletrolítico	Isento	7,97	67
	I	8,11	35

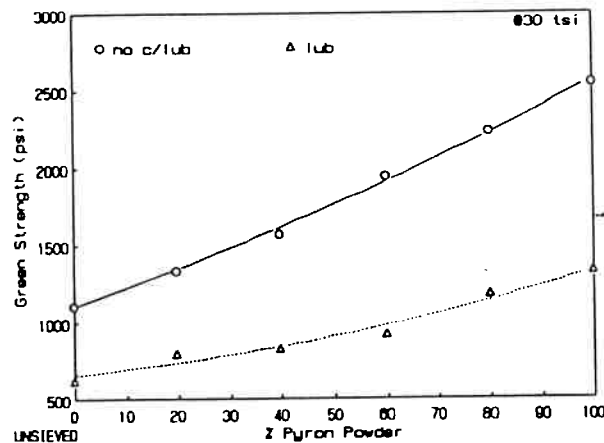


Figura 22 - Variação da resistência a verde com adição de pó de ferro Pyron (partículas irregulares) e lubrificante sobre pó de ferro Ancorsteel (partículas esféricas)^[5]

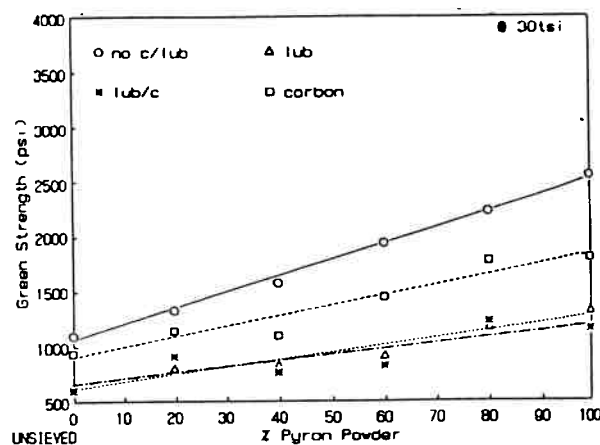


Figura 23 - Variação da resistência a verde com efeito da adição combinada de pó de ferro Pyron, carbono e lubrificante sobre pó de ferro Ancorsteel^[5]

3. Materiais, Equipamentos e Métodos Utilizados

3.1. Materiais Utilizados

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais e quantidades:

Pó de ferro Trifer DS 205	10 kg
Lubrificantes tipo Cera	
Ceracer 126 P	350 g
Allwax	200 g
Lubrificantes tipo Estearato de Metal	
Estearato de Zinco paranaense	200 g
Estearato de Zinco 135	200 g
Stavinor Zinc E	200 g
Lubrificantes tipo Compósito	
Caplube G	200 g
Ferrolube M	200 g
Kenolube	200 g

3.1.1. Pó de ferro Trifer DS 205^[12,13]

É um pó de ferro elementar, produzido por atomização e redução, destinado à fabricação de peças de média densidade (de 6,4 a 6,8 g/cm³) por compactação e sinterização.

Este pó, adquirido em embalagens "big bag" com 1.500 kg, é utilizado na produção de guias de haste de amortecedores, pistões, bielas e bielas bipartidas de compressores e rotores internos da bomba de óleo de automóveis.

As especificações de composição química, distribuição granulométrica e propriedades são apresentadas nas tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Especificação da composição química do pó de ferro Trifer DS 205^[12]

Elemento	Ensaio ASTM	Teor Máximo (%)
Carbono (C)	E 1019-93	0,015
Enxofre (S)	E 1019-93	0,020
Silício (Si)	E 415-85	0,050
Fósforo (P)	E 415-85	0,015
Manganês (Mn)	E 415-85	0,150
Perda por Hidrogênio (O)	E 159-86	0,200

Tabela 10 - Especificação da distribuição granulométrica (ensaio ASTM B 214-92) do pó de ferro Trifer DS 205^[12]

Malha ASTM	Teor Retido Mínimo (%)	Teor Retido Máximo (%)
+ 80		2,0
- 80 + 100		15,0
- 100 + 140	10,0	30,0
- 140 + 200	10,0	30,0
- 200 + 325	20,0	40,0
- 325	10,0	25,0

Tabela 11 - Especificação das propriedades do pó de ferro Trifer DS 205^[12]

Propriedade	Ensaio ASTM	Mínimo	Máximo
Densidade Aparente (g/cm ³)	B 212-89	2,60	2,80
Escoabilidade (s/50g)	B 213-90		32,0
Compressibilidade a 500 MPa (g/cm ³)	E 331-85	6,80	

3.2. Equipamentos Utilizados

Foram utilizados os seguintes equipamentos neste trabalho:

- Máquina de tração-compressão KRATOS com capacidade de 30.000 kgf, dotada de célula de carga digital (figura 24);
- Matriz de compactação de barras para ruptura transversal, figura 25;
- Matriz de compactação de anéis para compressibilidade (figura 25);
- Dispositivo de medida de resistência a verde por ruptura transversal (figura 26);
- Funil de Hall - mostrado esquematicamente na figura 3;
- Peneirador de laboratório, esquematicamente apresentado na figura 27, com jogo de peneiras de 80, 100, 140, 200 e 325 mesh;
- Misturador Lombard tipo duplo-cone com capacidade de 5 kg e rotação de 22 rpm (figura 28);
- Durômetro Georg Reicheter modelo Briviskop 3000D com penetrador esférico de 5,0 mm de diâmetro;
- Forno de sinterização tipo esteira contínua;
- Microscópio ótico;
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV) dotado de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), figura 29;
- Metalizador de amostras Edwards;
- Balança Micronal B1600 com precisão de 0,01 g;
- Balança Mettler AE50 com precisão de 0,0001 g;
- Balança Toledo 2090XV com precisão de 5 g;

- Cronômetro com precisão de 0,01 s;
- Nível de precisão;
- Relógio comparador digital;
- Micrômetros 0-25 e 25-50 mm com precisão de 0,01 e 0,001 mm; e
- Paquímetro com precisão de 0,01 mm.

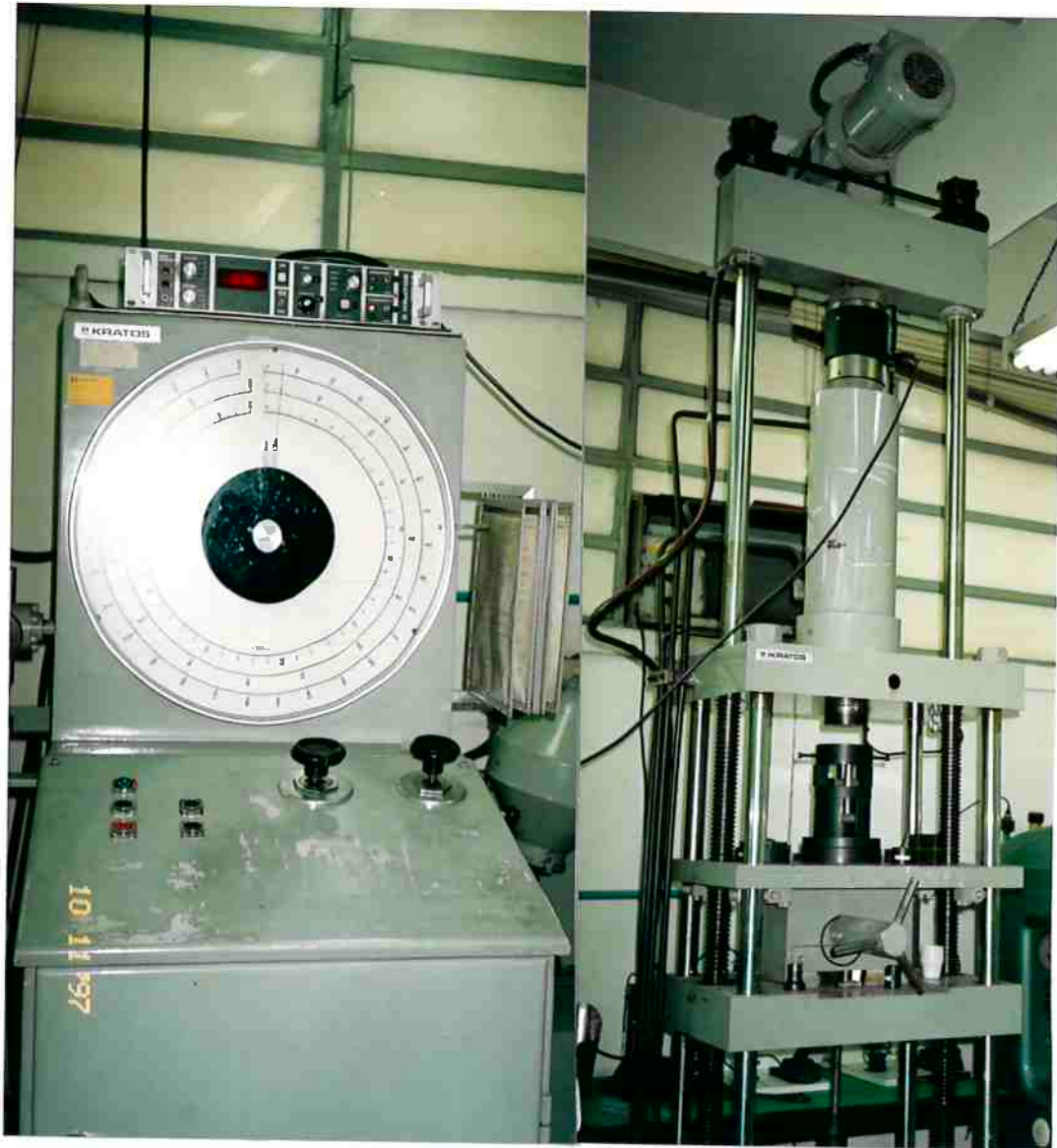


Figura 24 - Máquina de tração-compressão KRATOS



Figura 25 - Matrizes de compactação de barras e anéis

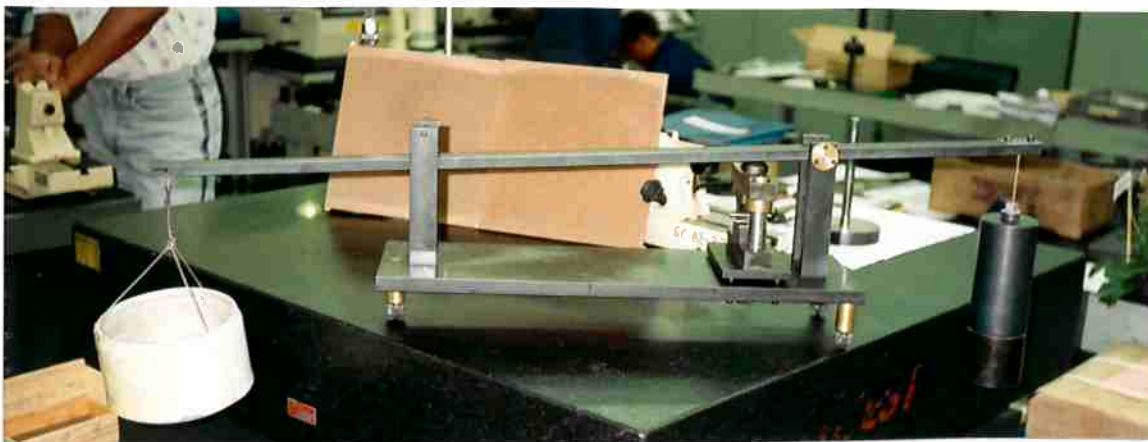


Figura 26 - Dispositivo de medida de resistência a verde por ruptura transversal

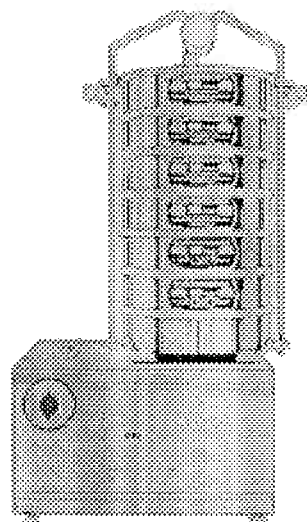


Figura 27 - Máquina de peneirar utilizada em laboratório^[2]

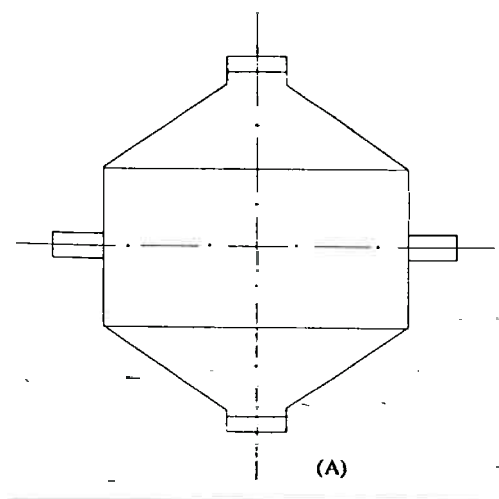


Figura 28 - Misturador tipo duplo-cone^[27]



Figura 29 - MEV dotado de EDS

3.3. Procedimentos Experimentais

Foram padronizados todos os procedimentos experimentais, com o intuito de minimizar a influência de variáveis não controladas nos resultados experimentais. Os métodos utilizados neste trabalho foram:

1. Retirada das amostras;
2. Análise granulométrica do pó de ferro;
3. Elaboração das misturas;
4. Ensaio de densidade aparente da mistura;
5. Ensaio de escoabilidade da mistura;
6. Ensaio de compressibilidade da mistura;
7. Medida da resistência a ruptura transversal;
8. Sinterização; e
9. Medida da dureza aparente.

3.3.1. Retirada das Amostras^[14]

Devido à ausência de dispositivo de retirada de amostra de pós, adotou-se o procedimento de submergir uma concha no pó e, após a homogeneização do mesmo com a concha, retirar-se a amostra.

3.3.2. Análise Granulométrica do Pó de Ferro^[23,24]

O conjunto de peneiras é montado ordenadamente com a peneira de maior abertura por cima, decrescendo a abertura até o fundo coletor dos finos, sobre o peneirador. Adiciona-se a amostra de $100,00 \pm 0,01$ g de pó de ferro (obtida por quarteamento), tampa-se as peneiras e liga-se o peneirador por quinze minutos.

Partindo-se da peneira mais grossa, cada peneira é batida levemente, despejando-se o pó retido sobre papel vegetal e pesando-o com precisão de 0,1 g. O pó preso ao fundo da peneira é despejado na peneira mais fina seguinte. A fração retida em cada peneira é expressa com precisão de 0,1 %. Frações menores que este valor são expressas como traços. A soma das massas de todas as frações deve ser superior a 98 g.

3.3.3. Elaboração das Misturas

Inicialmente, são pesados 1 kg de pó de ferro e 7,5 g de lubrificante, ambos com precisão de 0,01 g. Coloca-se aproximadamente metade do pó de ferro no misturador, adiciona-se o lubrificante e, a seguir, o restante do pó de ferro. Liga-se o misturador por 10 min e, então, realiza-se a limpeza das regiões das tampas do misturador, que ficam ricas em lubrificante. O equipamento é ligado novamente por mais 10 minutos.

3.3.4. Ensaio de Densidade Aparente da Mistura^[15,16]

Inicialmente o funil de Hall é limpo cuidadosamente. Determina-se as dimensões e peso do recipiente que receberá o pó. Então, pesa-se 100 g de mistura e deposita-se esta amostra sobre o funil. Após o escoamento do pó pelo funil, com o auxílio de uma espátula não-magnética, nivela-se o pó. Para evitar a perda de material, o recipiente é batido e, a seguir, pesado.

3.3.5. Ensaio de Escoabilidade da Mistura^[17,18]

Após a limpeza do funil de Hall, coloca-se uma amostra de 50 g da mistura no funil com o orifício fechado por um dedo do operador. O cronômetro é acionado quando o dedo é retirado, sendo parado quando o pó acabar de escoar pelo funil.

Para evitar que a umidade altere a escoabilidade do pó todos os utensílios são secos antes sua utilização, incluindo-se o dedo do operador.

3.3.6. Ensaio de Compressibilidade e Força de Extração da Mistura^[19,20,21,22]

Este ensaio consiste na compactação uniaxial de anéis da mistura com diâmetros externo e interno de aproximadamente 30,0 e 16,0 mm em uma matriz cilíndrica fechada a uma pressão constante de 4,6 ton/cm² (460 MPa). A matriz previamente limpa é apoiada em dois calços, enchida com a mistura e o pó nivelado com uma espátula não-magnética. Posiciona-se o punção superior, aplica-se e alivia-se uma pré-carga de 20 kN (40 MPa). Retiram-se os calços e aplica-se a carga total de 230 kN, a uma velocidade aproximadamente constante e não superior a 50 kN/s. O anel compactado é ejetado com o uso de calços extratores a uma velocidade aproximadamente constante e a carga de extração

é anotada. Após a rebarbação, o anel é pesado com precisão de $\pm 0,0001$ g e medido com precisão de $\pm 0,005$ mm (diâmetros) e $\pm 0,001$ mm (espessura). A compressibilidade, expressa com precisão de $\pm 0,01$ g/cm³, é obtida pela divisão da massa pelo volume do anel.

Apesar do nome comumente utilizado, o termo "Força de Extração" (FE) refere-se na realidade à pressão de extração e é calculado pela divisão da carga de extração pela área de contato, através da seguinte fórmula:

$$FE = \frac{P}{(D_{matriz} + D_{macho}) * h * \pi}$$

onde: P = Carga de extração, em N;
 D_{matriz} = Diâmetro da matriz (29,925 mm);
 D_{macho} = Diâmetro do macho (16,205 mm); e
 h = Altura do anel compactado, em milímetros.

3.3.7. Medida da Resistência a Ruptura Transversal^[2,25]

Devem ser compactados no mínimo três corpos de prova retangulares de aproximadamente 30 x 12 mm, com espessura entre 5,5 e 6,5 mm. A espessura deve ter variação máxima de 0,1 mm, para não influir na medida da resistência a ruptura transversal.

Após a limpeza da matriz, a mesma é montada com dois calços. Adiciona-se aproximadamente 16,00 g da mistura e agita-se a matriz (para evitar variações de espessura do compactado). Aplica-se uma pré-carga de aproximadamente 21 kN, retira-se os calços, aplica-se a carga para se atingir uma densidade a verde de $6,55 \pm 0,05$ g/cm³, a uma velocidade aproximadamente constante e não superior a 50 kN/s, e extrai-se a barra compactada e realiza-se a sua rebarbação.

Para a determinação da resistência a verde, o corpo de prova é medido com precisão de 0,01 mm e pesado com precisão de 0,0001 g, determinando-se a sua densidade. O corpo de prova é posicionado no dispositivo de quebra e este é montado no aparelho de aplicação de carga por meio de sistema de alavanca, como pode ser observado na figura 26. Adiciona-se pó de ferro no recipiente a uma taxa constante, tal que o tempo necessário para a ruptura seja superior a 10 segundos. Pesa-se a massa do pó de ferro aproximando-se o valor em 0,005 kg. A força de ruptura pode ser calculada como:

$$F = \frac{A * X * g}{B}$$

onde: A = Comprimento A em milímetros (figura 30);
 B = Comprimento B em milímetros (figura 30);
 g = Aceleração da gravidade, assumida como 10 m/s^2 ;
 X = Peso de pó de ferro para ruptura, aproximado para $0,005 \text{ kg}$
 F = Força de ruptura aplicada no corpo de prova em Newtons;

A resistência a verde, RV , obtida por ruptura transversal, em MPa, é calculada através da fórmula:

$$RV = \frac{3 * F * d}{2 * e^2 * l}$$

onde: d = é a distância entre os centros dos suportes do dispositivo de ruptura, em milímetros (figura 30);
 e = espessura média do corpo de prova, em milímetros;
 l = largura média do corpo de prova, em milímetros;

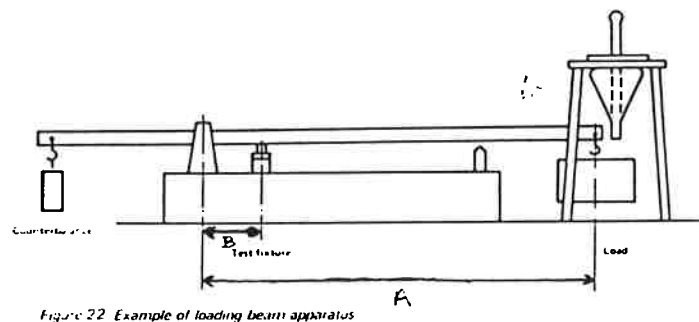
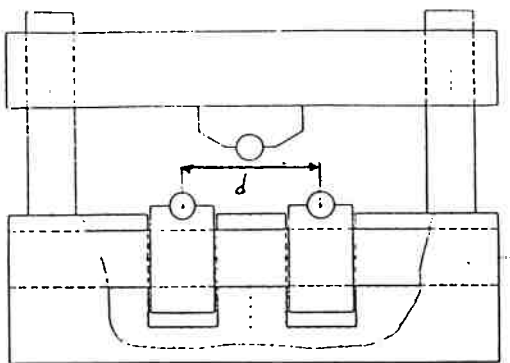


Figura 30 - Esquema do dispositivo de medida de resistência a verde por ruptura transversal mostrando dimensões A , B e d , adaptado de Metallnormcenter[2]

Para a determinação da resistência do sinterizado, a barra é medida com precisão de $0,001 \text{ mm}$ (para verificar variações dimensionais na sinterização) e pesada com precisão de $0,0001 \text{ g}$. O corpo de prova é colocado no dispositivo de quebra e este é montado na prensa KRATOS. Aumenta-se a carga aplicada de modo uniforme até a ruptura do corpo de prova, de modo que o tempo para a ruptura seja superior a 10 segundos. A força de ruptura é obtida pela carga da prensa e a resistência do sinterizado é calculada de modo análogo à resistência a verde.

3.3.8. Sinterização

Os corpos de prova foram sinterizados a 1120°C em um forno de sinterização tipo esteira contínua com atmosfera de nitrogênio e metanol. Os detalhes da operação estão descritos nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Tempo e temperatura de cada fase da sinterização

	Pré-Aquecimento	Câmara Quente	Resfriamento Lento	Resfriamento Rápido
Temperatura (°C)	700	1120	n. d.	n. d.
Tempo (min)	23	21	7	52

n. d. = não disponível

Tabela 13 - Atmosfera e vazão de nitrogênio no forno de sinterização

Atmosfera		Vazão de Nitrogênio (m³/h)	
Metanol (l/h)	5	Pré-Aquecimento	4,5
CO (%)	3,25	Topo	11,0
CO ₂ (%)	0,25	Lateral	6,0
CH ₄ (%)	0	Resfriamento	20,5
Ponto de Orvalho (°C)	- 2,1	"Base Jet"	3,0

3.3.9. Medida da Dureza Aparente

Devido à presença de porosidade, a dureza de materiais sinterizados obtida através de uma indentação e conversão em escala padrão é referida como dureza aparente, sendo uma combinação da dureza da partícula do pó e da porosidade, como ilustrado na figura 31. A dureza aparente de materiais sinterizados, portanto, não pode ser diretamente comparada com a dureza de materiais trabalhados.

Várias escalas de dureza (HRB 100, HB 62,5, HRF, HRH e HB 250) foram testadas para medir a dureza aparente das barras sinterizadas. A escala de dureza escolhida foi HB 250 kg com penetrador esférico de 5,0 mm de diâmetro pois as demais revelaram-se inadequadas devido à baixa dureza do material ou à grande dispersão nos resultados.

Após a indentação do corpo de prova, o diâmetro da penetração, em milímetros, era determinado em duas medidas perpendiculares e convertido para a escala de dureza por meio de uma tabela. Foram realizadas entre três e cinco medidas, de acordo com a variação obtida nas amostras (desvio entre as medidas) e a área disponível para indentação.

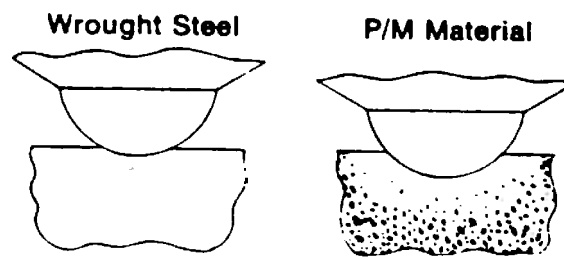


Figura 31 - Identação maior no produto sinterizado devido ao efeito de densificação na região da identação^[28]

4. Resultados

Para simplificar a apresentação dos resultados, as misturas receberão a seguinte denominação:

- A1 DS 205 + 0,75% Ceracer 126P
- A2 DS 205 + 0,75% Ceracer 126P - controle I
- A3 DS 205 + 0,75% Ceracer 126P - controle II
- B DS 205 + 0,75% Allwax
- C DS 205 + 0,75% Caplube G
- D DS 205 + 0,75% Ferrolube M
- E DS 205 + 0,75% Estearato de Zinco paranaense
- F DS 205 + 0,75% Estearato de Zinco 135
- G DS 205 sem lubrificante - referência
- H DS 205 + 0,75% Kenolube P11
- I DS 205 + 0,75% Stavinor Zinc E

4.1. Análise do Pó de Ferro

4.1.1. Análise Granulométrica

O resultado do ensaio de análise granulométrica é apresentado na tabela 14 e figuras 32 e 33.

Tabela 14 - Resultados da análise granulométrica do pó de ferro Trifer DS 205

Malha ASTM	Tamanho Médio da Partícula (µm)	Especificação Teor Retido (%)	Teor Retido (%)	Teor Retido Acumulado (%)
+ 80	180	2,0 máx.	0,4	100,0
- 80 + 100	165	15,0 máx.	4,3	99,6
- 100 + 140	128	10,0 - 30,0	28,1	95,3
- 140 + 200	91	10,0 - 30,0	22,6	67,2
- 200 + 325	60	20,0 - 40,0	28,4	44,6
- 325	30	10,0 - 25,0	16,2	16,2

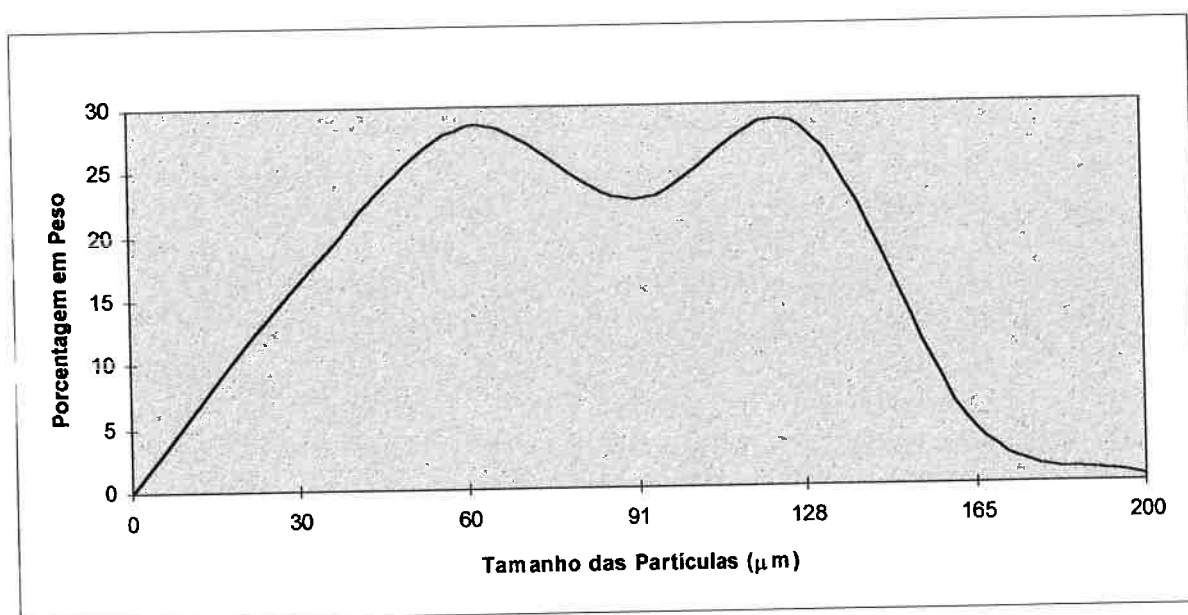


Figura 32 - Gráfico da distribuição do tamanho da partícula do pó de ferro Trifer DS 205, apresentando distribuição bimodal

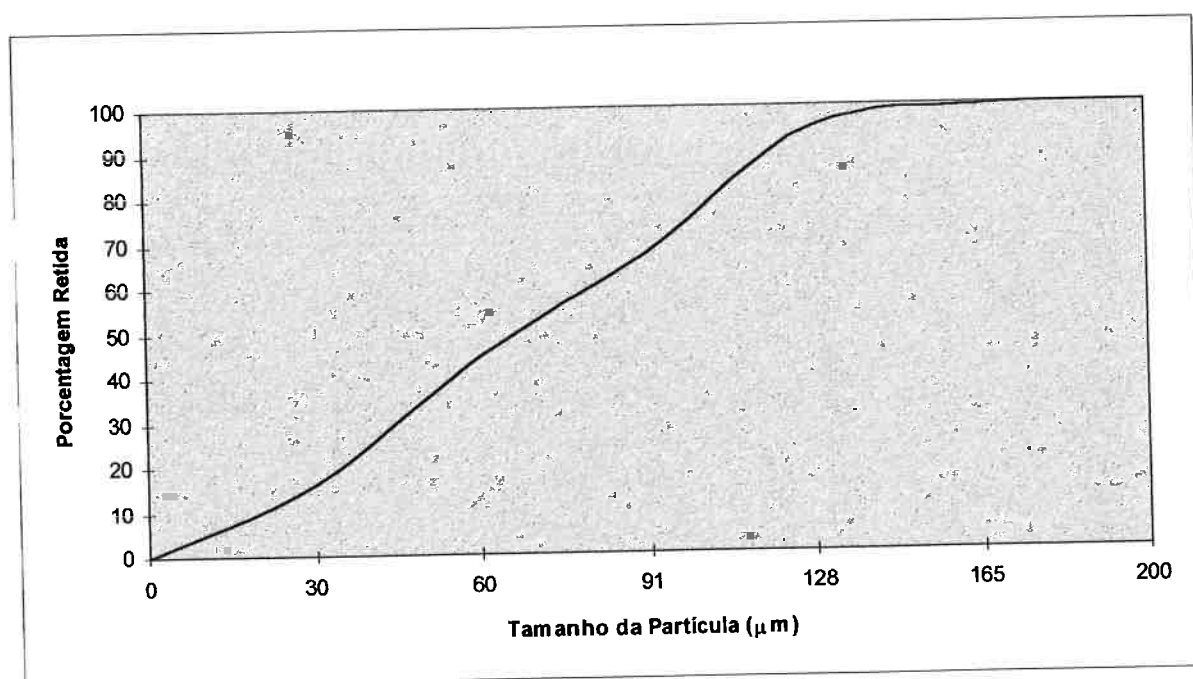


Figura 33 - Gráfico do teor retido acumulado em função do tamanho da partícula do pó de ferro Trifer DS 205, mostrando tamanho médio de partícula (d_{50}) de aproximadamente 68 μm

4.1.2. Impurezas, Porosidade e Forma das Partículas

O pó de ferro foi embutido a frio, lixado (liixas 120, 400 e 600), polido com diamante (6 e 3 μm) e com alumina (1 μm), recoberto com grafite e observado no MEV para análise da porosidade interna e das impurezas, inclusive sua composição química. Outra amostra de pó foi jogada solta sobre uma fita dupla-face condutora, retirou-se o excesso de pó e recobriu-se a amostra com ouro. Esta amostra foi observada no MEV para análise da forma das partículas.

Observou-se que a maioria das partículas não apresenta porosidade interna. A figura A1/1 (Anexo 1) apresenta uma partícula que apresentou porosidade. A forma das partículas do pó de ferro DS 205 pode ser vista nas figuras A1/2 e A1/3, na qual observam-se partículas irregulares equiaxiais e outras mais alongadas.

Foram encontradas algumas regiões com maior concentração de impurezas, ilustradas nas figuras A1/4 e A1/5. As impurezas, com tamanho variando entre cerca de 15 e 40 μm , são constituídas de titânio, alumínio, zircônia e silício ou alumínio e titânio, como pode ser observado nas figuras A1/6 a A1/8. A impureza da figura A1/5 é constituída somente de alumínio, podendo ser proveniente do polimento da amostra.

4.2. Análise dos Lubrificantes

Amostras dos lubrificantes foram colados em suportes com fita dupla-face condutora. Após a retirada do excesso de pó, as amostras foram metalizadas com ouro e observadas no MEV, analisando-se a forma e tamanho das suas partículas. Os resultados encontram-se nas figuras A2/1 a A2/6 (Anexo 2).

4.3. Análise das Misturas

4.3.1. Densidade Aparente

Os dados levantados no ensaio de densidade aparente estão na tabela 15 e figura 34.

Tabela 15 - Densidade Aparente das Misturas

Mistura	Massa (g)			Densidade Aparente (g/cm³)			Média	Desvio
A1	150,42	150,69	150,63	2,70	2,71	2,70	2,70	0,01
A2	149,71	149,89	149,14	2,67	2,67	2,64	2,66	0,02
A3	149,70	150,10	150,28	2,67	2,68	2,69	2,68	0,01
B	151,43	150,91	150,96	2,74	2,72	2,72	2,72	0,01
C	154,24	155,04	154,69	2,85	2,88	2,87	2,87	0,02
D	153,82	154,12	153,68	2,83	2,84	2,83	2,83	0,01
E	156,58	156,40	156,39	2,94	2,94	2,93	2,94	0,00
F	156,12	156,75	156,51	2,92	2,95	2,94	2,94	0,01
G	149,39	149,33	149,08	2,65	2,65	2,64	2,65	0,01
H	149,59	149,38	149,78	2,66	2,65	2,67	2,66	0,01
I	154,87	154,76	154,85	2,87	2,87	2,87	2,87	0,00

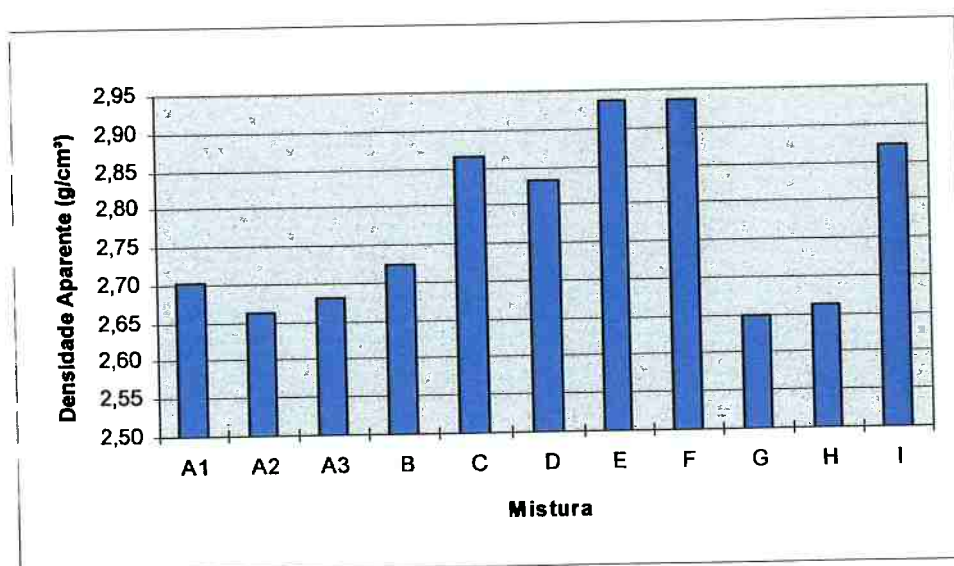


Figura 34 - Gráfico da densidade aparente média das misturas, ilustrando maior densidade aparente das misturas à base de estearato de metal (E, F, e I)

A1 Ceracer
 A2 Ceracer - controle I
 A3 Ceracer - controle II
 B Allwax
 C Caplube G
 D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
 F Estearato de Zinco 135
 G DS 205 sem lubrificante - referência
 H Kenolube P11
 I Stavinor Zinc E

4.3.2. Escoabilidade

O resultado do ensaio de escoabilidade das misturas pode ser visualizado na tabela 16 e figura 35. A escoabilidade da mistura H (Kenolube P11) não está apresentada na tabela nem na figura pois o seu fluxo interrompe-se durante o ensaio pela aderência da mistura à parede do funil de Hall.

Tabela 16 - Escoabilidade das misturas

Mistura	Escoabilidade (s/50g)			Média	Desvio
A1	33,42	34,06	34,03	33,84	0,36
A2	34,49	34,54	34,68	34,57	0,10
A3	33,95	34,02	33,83	33,93	0,10
B	35,74	35,28	35,53	35,52	0,23
C	28,83	29,32	29,49	29,21	0,34
D	29,42	29,65	30,15	29,74	0,37
E	28,68	28,83	28,87	28,79	0,10
F	28,53	28,42	28,80	28,58	0,20
G	30,08	30,10	29,73	29,97	0,21
H	-	-	-	-	-
I	29,29	29,38	28,77	29,15	0,33

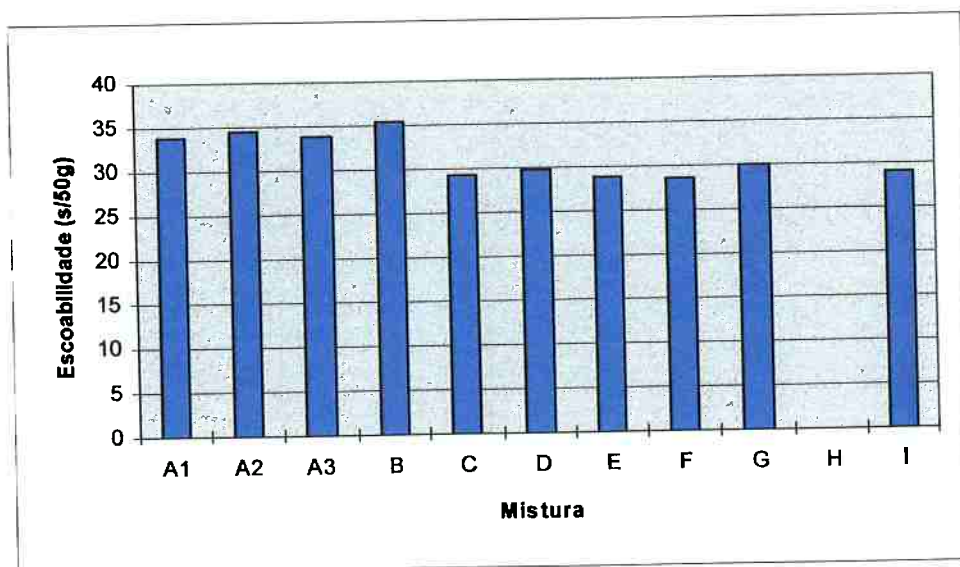


Figura 35 - Gráfico da escoabilidade das misturas, apresentando menor escoabilidade das misturas com lubrificante tipo ceras (A e B), e mistura Kenolube P11 (H) que apresenta aderência do pó ao funil de Hall

A1 Ceracer
 A2 Ceracer - controle I
 A3 Ceracer - controle II
 B Allwax
 C Captube G
 D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
 F Estearato de Zinco 135
 G DS 205 sem lubrificante - referência
 H Kenolube P11
 I Stavinor Zinc E

4.3.3. Compressibilidade e Força de Extração

A tabela 17 e as figuras 36 e 37 apresentam a compressibilidade média e força de extração média das misturas. Os dados de cada corpo de prova estão apresentados no Anexo 3.

Tabela 17 - Compressibilidade média e força de extração média das misturas

Mistura	Compressibilidade (g/cm ³)		Força Extração (MPa)	
	Média	Desvio	Média	Desvio
A1	6,52	0,05	50,6	1,1
A2	6,56	0,02	48,7	2,8
A3	6,54	0,03	45,5	3,5
B	6,51	0,01	50,9	0,9
C	6,53	0,02	58,6	5,8
D	6,56	0,02	53,1	2,3
E	6,57	0,07	50,4	1,6
F	6,61	0,00	49,6	0,0
G	6,34	0,02	76,1	2,3
H	6,50	0,02	52,1	0,1
I	6,56	0,02	49,8	3,7

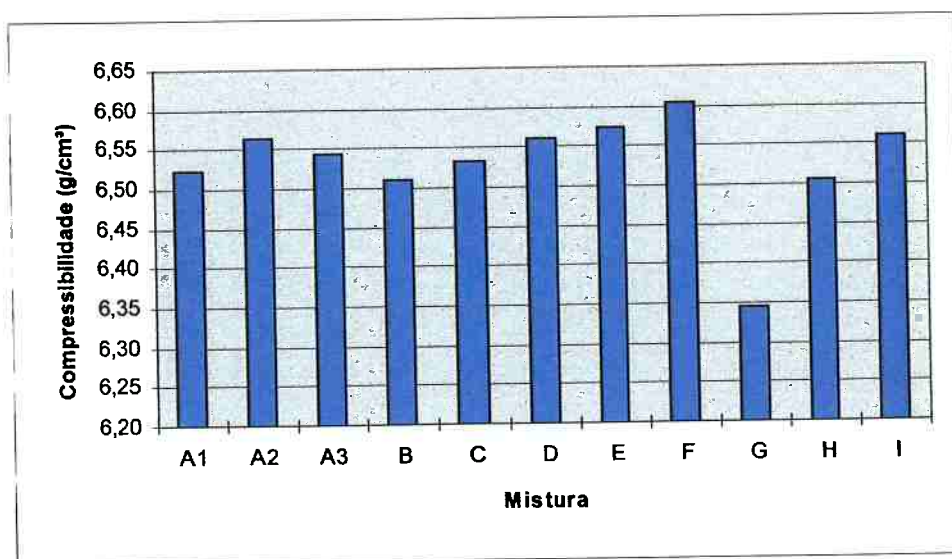


Figura 36 - Gráfico da compressibilidade média das misturas, mostrando aumento da compressibilidade com adição de lubrificante ao pó de ferro

A1 Ceracer
 A2 Ceracer - controle I
 A3 Ceracer - controle II
 B Allwax
 C Caplube G
 D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
 F Estearato de Zinco 135
 G DS 205 sem lubrificante - referência
 H Kenolube P11
 I Stavinor Zinc E

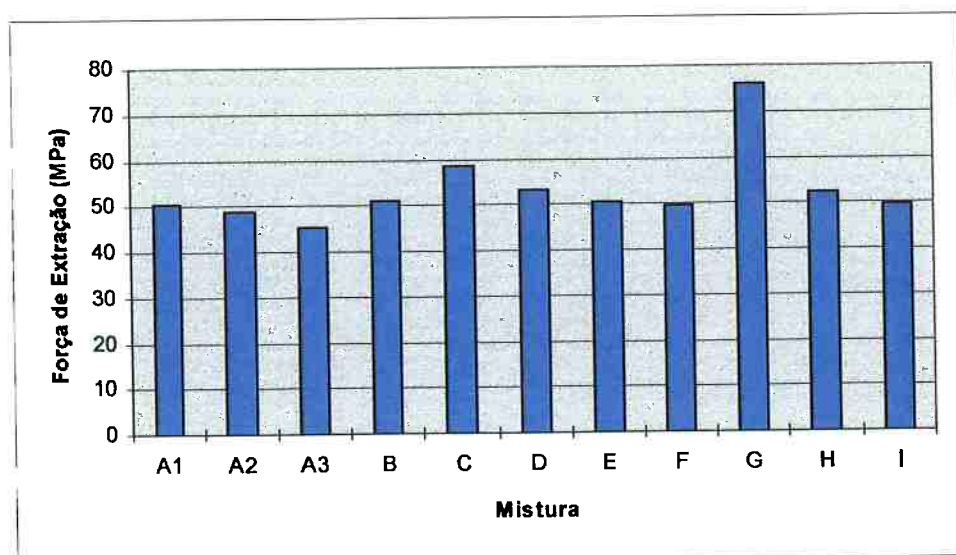


Figura 37 - Gráfico da força de extração média das misturas, apresentando a significativa redução da pressão de extração com a adição de lubrificante

A1	Ceracer	E	Estearato de Zinco paranaense
A2	Ceracer - controle I	F	Estearato de Zinco 135
A3	Ceracer - controle II	G	DS 205 sem lubrificante - referência
B	Altmax	H	Kenolube P11
C	Caplube G	I	Stavinox Zinc E
D	Ferrolube M		

4.3.4. Compactação

A seguir estão apresentados as figuras 38 a 42, gráficos da pressão de compactação x densidade a verde para as amostras de compressibilidade (anéis) e as amostras de ruptura transversal (barras). Os dados de cada amostra deste segundo grupo podem ser observados no Anexo 4.

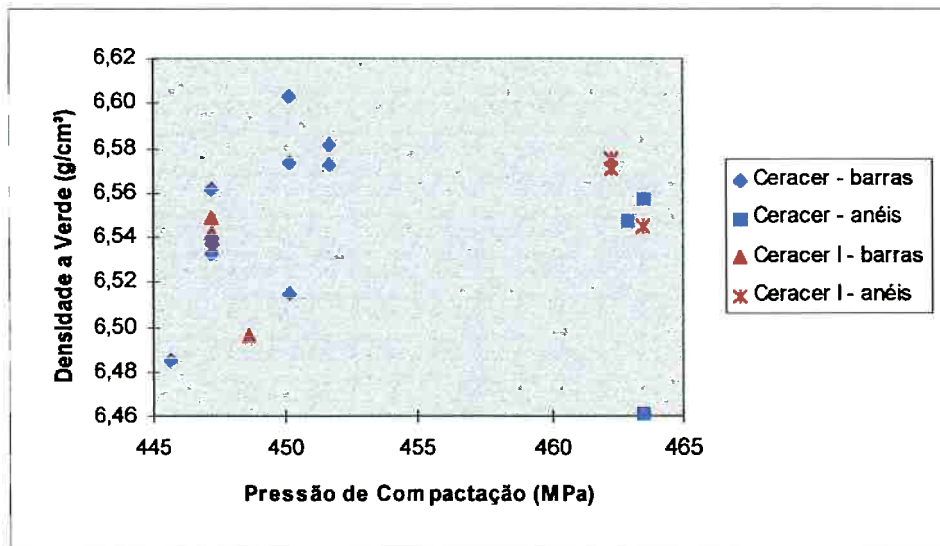


Figura 38 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Ceracer (A1) e Ceracer - controle I (A2), cujas barras atingiram a densidade desejada com pressões abaixo de 450 MPa

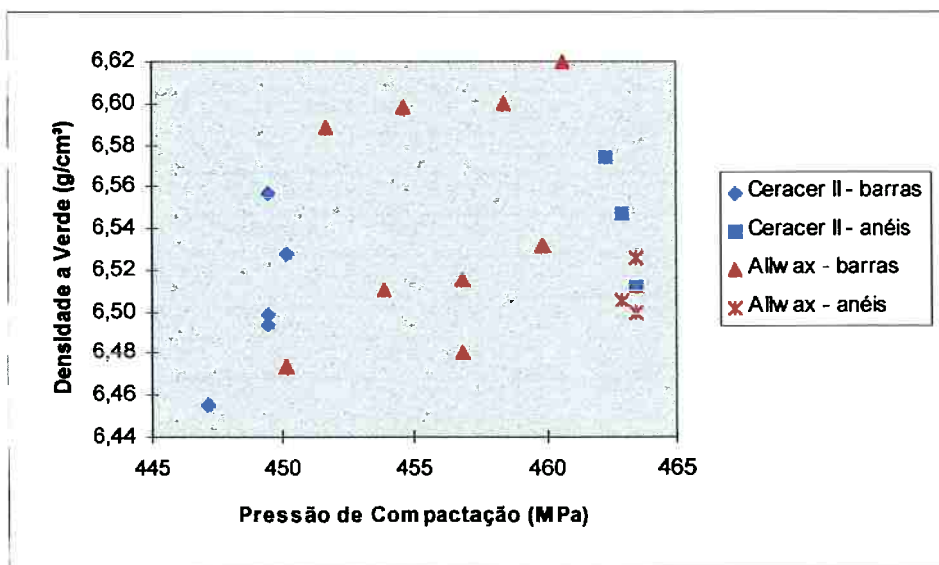


Figura 39 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Ceracer - controle II (A3) e Allwax (B), mostrando grande dispersão na pressão de compactação de barras da mistura B

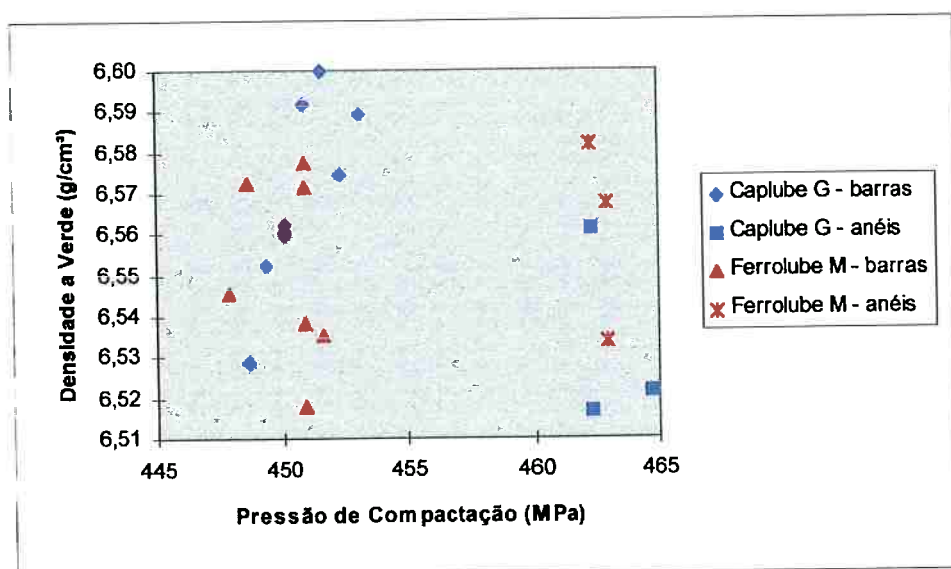


Figura 40 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Caplube G (C) e Ferrolube M (D), que apresentaram pressão para compactar as barras ultrapassando 450 MPa

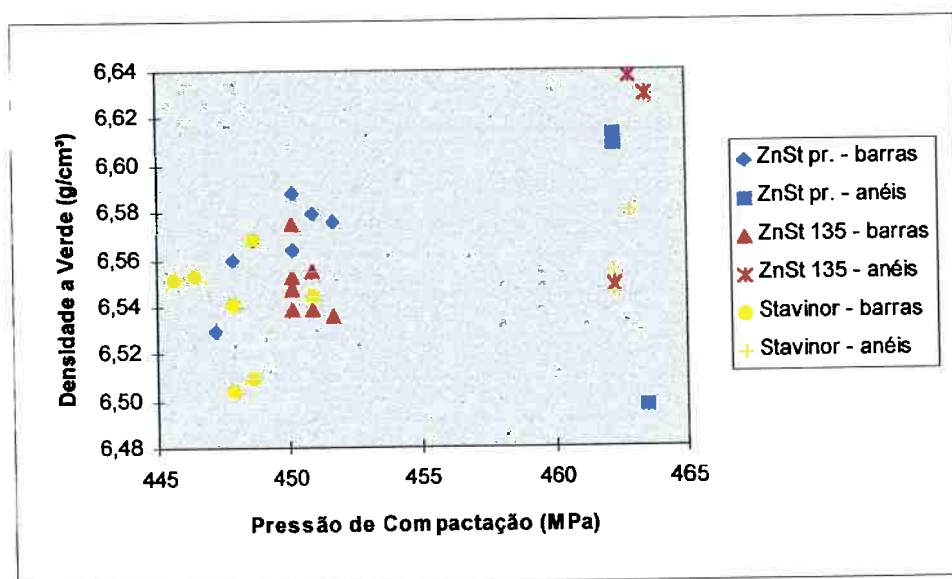


Figura 41 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas ZnSt paranaense (E), ZnSt 135 (F) e Stavinor Zinc E (I), cujas pressões de compactação das barras ultrapassaram 450 MPa

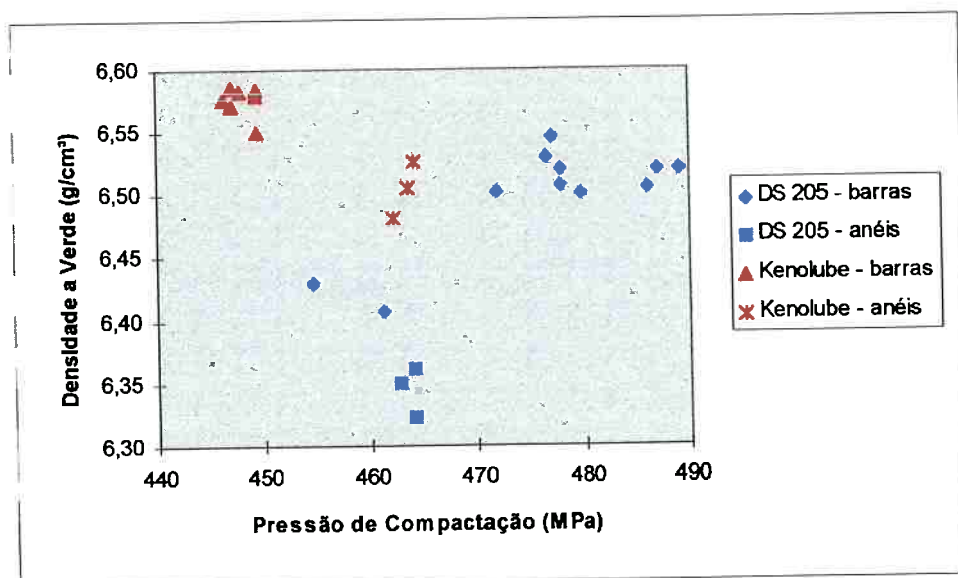


Figura 42 - Pressão de compactação x densidade a verde para as misturas Kenolube P11 (H) e sem lubrificante (G). Nota-se pressão para compactar as barras acima de 470 MPa para a mistura G e abaixo de 450 MPa para H.

4.3.5. Resistência a Verde

A tabela 18 e a figura 43 expõe a resistência a verde média das misturas, sendo o valor de cada amostra detalhado no Anexo 5.

Tabela 18 - Resistência a verde média das misturas

Mistura	Resistência a Verde (MPa)	
	Média	Desvio
A1	16,9	1,1
A2	16,1	0,5
A3	16,7	0,5
B	18,9	0,2
C	16,6	0,1
D	16,7	0,3
E	16,6	0,6
F	16,8	0,5
G	26,1	1,9
H	19,2	0,3
I	16,8	1,1

A1 Ceracer
A2 Ceracer - controle I
A3 Ceracer - controle II
B Allwax
C Caplube G
D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
F Estearato de Zinco 135
G DS 205 sem lubrificante - referência
H Kenolube P11
I Stavinor Zinc E

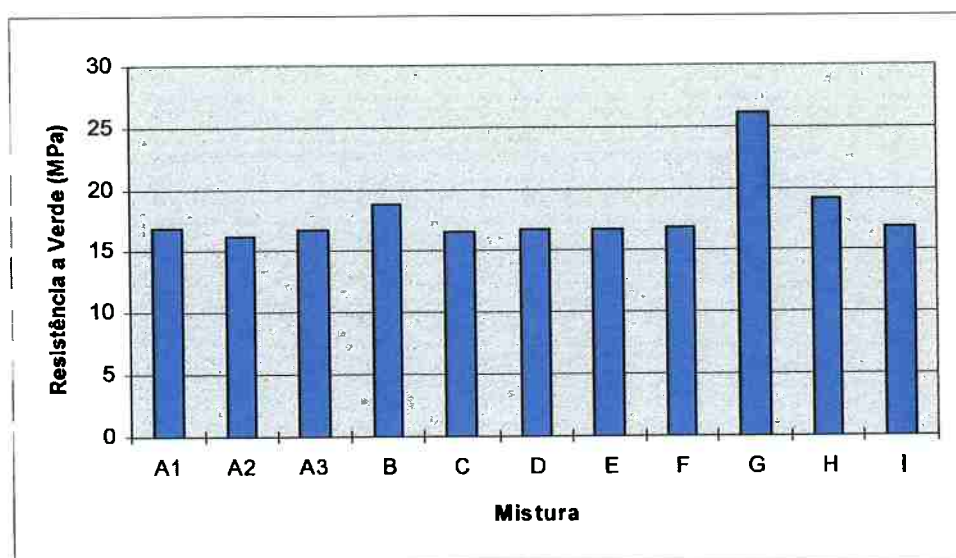


Figura 43 - Gráfico da resistência a verde (RV) média para as misturas, onde verifica-se queda da RV com lubrificação e maiores valores de RV para misturas Allwax (B) e Kenolube P11 (H)

4.3.6. Resistência do Sinterizado

A resistência do sinterizado média de cada mistura é ilustrada na tabela 19 e figura 44. Os dados detalhados estão no Anexo 6.

Tabela 19 - Resistência do sinterizado média das misturas

Mistura	Resistência do Sinterizado (MPa)	
	Média	Desvio
A1	360	9
B	369	7
C	355	12
D	388	7
E	356	16
F	351	16
G	373	23
H	385	2
I	346	10

A1 Ceracer
A2 Ceracer - controle I
A3 Ceracer - controle II
B Allwax
C Caplube G
D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
F Estearato de Zinco 135
G DS 205 sem lubrificante - referência
H Kenolube P11
I Stavinor Zinc E

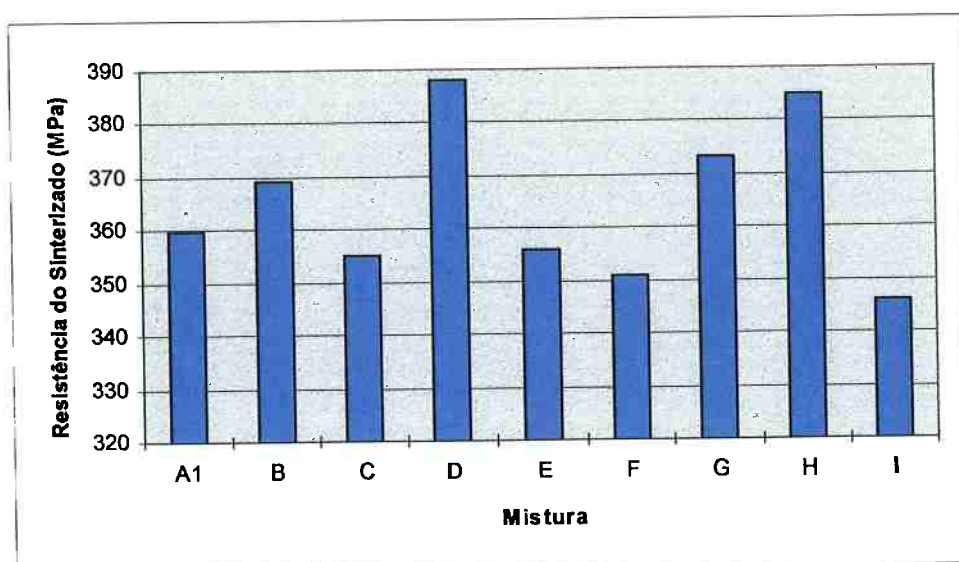


Figura 44 - Gráfico da resistência média do sinterizado (RS) para as misturas, destacando maior RS das misturas Ferrolube M (D) e Kenolube P11 (H)

4.3.7. Variação Volumétrica na Sinterização

O valor médio da variação volumétrica de contração dos corpos de prova de cada mistura na sinterização está exposto na tabela 20 e figura 45. Os dados detalhados por corpo de prova estão no Anexo 6.

Tabela 20 - Valor médio da variação volumétrica de contração das misturas na sinterização

Mistura	Contração Volumétrica (%)	Desvio
A1	0,84	0,07
B	0,86	0,04
C	0,83	0,17
D	0,99	0,06
E	0,49	0,32
F	0,61	0,10
G	0,38	0,08
H	0,72	0,06
I	0,50	0,15

A1 Ceracer
 A2 Ceracer - controle I
 A3 Ceracer - controle II
 B Allwax
 C Caplube G
 D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
 F Estearato de Zinco 135
 G DS 205 sem lubrificante - referência
 H Kenolube P11
 I Stavinor Zinc E

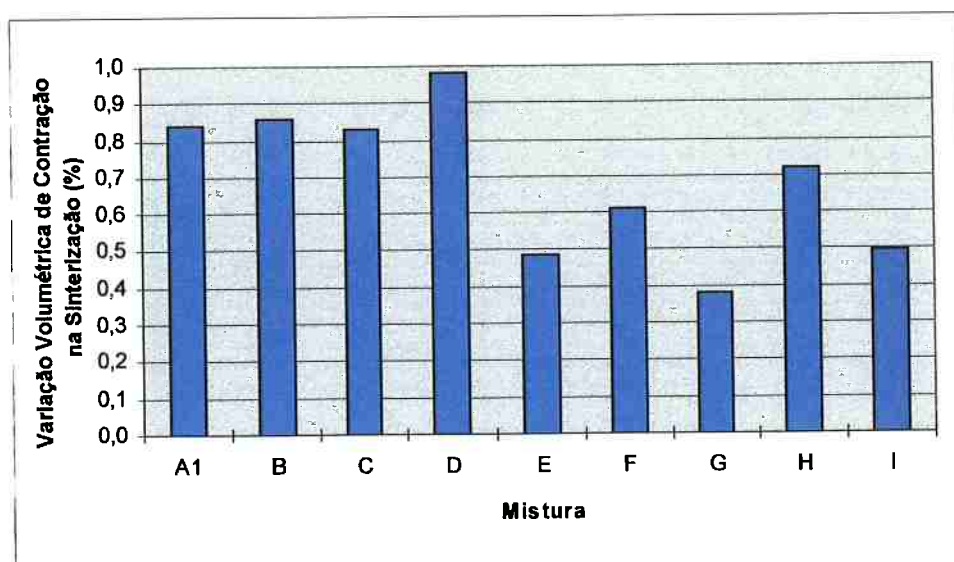


Figura 45 - Gráfico da variação volumétrica de contração média das misturas na sinterização, mostrando menor contração para misturas com lubrificante tipo estearato de metal (misturas E, F e I)

4.3.8. Dureza Aparente do Sinterizado

O resultado das medidas de dureza de cada amostra é apresentado no Anexo 7. A tabela 21 e a figura 46 fornecem os resultados consolidados de dureza média das misturas sinterizadas.

Tabela 21 - Dureza aparente média das misturas sinterizadas

Mistura	Dureza (HB 250)	Desvio
A1	56,1	1,6
B	53,2	1,5
C	54,2	0,6
D	55,6	0,2
E	53,6	2,1
F	51,4	0,6
G	48,0	1,6
H	54,3	2,5
I	50,9	0,5

A1 Ceracer
A2 Ceracer - controle I
A3 Ceracer - controle II
B Allwax
C Caplube G
D Ferrolube M

E Estearato de Zinco paranaense
F Estearato de Zinco 135
G DS 205 sem lubrificante - referência
H Kenolube P11
I Stavinor Zinc E

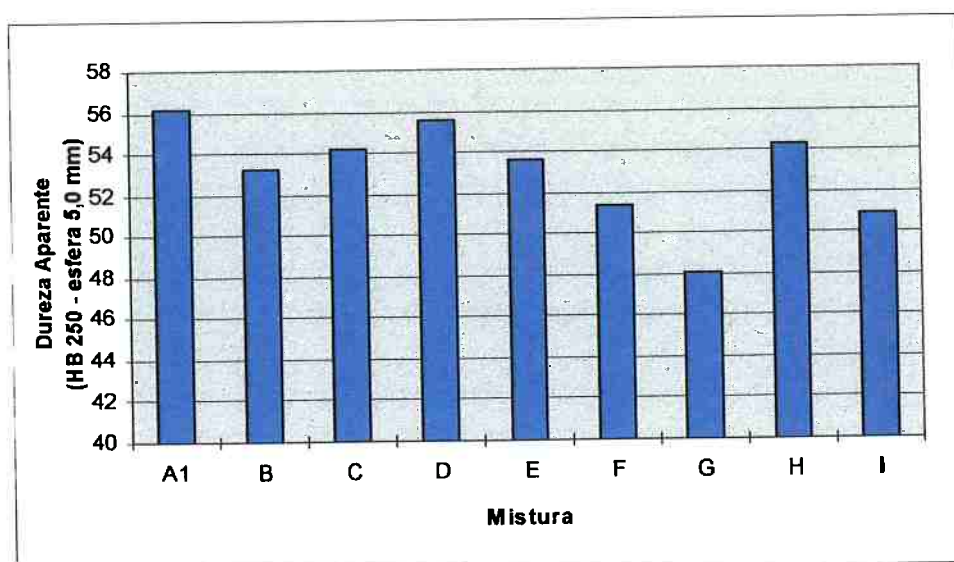


Figura 46 - Gráfico da dureza média das misturas sinterizadas, destacando-se aumento de dureza promovida pela lubrificação e as misturas Ceracer (A1) e Ferrolube M (D), mais duras que as demais

A1	Ceracer	E	Estearato de Zinco paranaense
A2	Ceracer - controle I	F	Estearato de Zinco 135
A3	Ceracer - controle II	G	DS 205 sem lubrificante - referência
B	Allwax	H	Kenolube P11
C	Caplube G	I	Stavinor Zinc E
D	Ferrolube M		

4.3.9. Microestrutura

As figuras A8/1 a A8/9 (Anexo 8) mostram as micrografias de uma barra de ensaio de ruptura transversal sinterizada de cada mistura. Estas foram obtidas através da corte de uma seção no "cut-off", embutimento a frio, e preparação metalográfica com lixas (120, 400 e 600) e poletrizes de diamante (6 e 3 μm) e de alumina (1 μm). As seções preparadas foram observadas sem ataque para facilitar a observação da porosidade. Para efeito de comparação, todas as micrografias estão com aumento de 100 vezes.

5. Discussão

5.1. Caracterização do Pó de Ferro

O pó de ferro apresenta uma distribuição de tamanho de partículas bimodal (figura 32), o que é adequado à metalurgia do pó pois provém partículas finas em quantidade adequada para preencherem os interstícios entre as partículas mais grossas, resultando em boas propriedades do pó. O tamanho médio das partículas do pó de ferro é 68 μm (figura 33). As partículas do pó são policristalinas.

As partículas do pó de ferro apresentam forma nodular ou irregular, tendo algumas delas apresentado porosidade interna. Esta morfologia é condizente com o método de obtenção do mesmo: atomização e redução.

Através da microscopia eletrônica da seção das partículas do pó e análise química por EDS (figuras A1/4 a A1/8 - Anexo 1), verificou-se que o pó de ferro não apresenta outros elementos em solução no ferro; e que há presença de partículas de impurezas constituídas de Al e Ti e Ti, Al, Zr, Si e Fe.

5.2. Caracterização dos Lubrificantes

As figuras A2/1 a A2/8 (Anexo 2) mostram que os lubrificantes Allwax (B), Caplube G (C), Ferrolube M (D) e Estearato de Zinco 135 (F) têm forma e tamanho de partículas semelhantes. As partículas destes lubrificantes apresentam formato angular e nodular.

O Estearato de Zinco paranaense (E), apresenta partículas de mesma forma, mas mais fina que os já citados. Espera-se que a mistura com o lubrificante ZnSt paranaense apresente boa compressibilidade e densidade aparente em função tanto das suas partículas muito finas como do tipo de lubrificante.

Os lubrificantes Ceracer 126P (A) e Kenolube P11 (H) apresentam partículas angulares e esféricas, com tamanho grande e intermediário, respectivamente. O maior tamanho das partículas do Ceracer deve proporcionar menor compressibilidade e densidade aparente, além de poder causar aglomeração do pó, reduzindo sua escoabilidade e aumentando a porosidade do produto final, o que é extremamente prejudicial às suas propriedades.

O lubrificante Stavinor Zinc E (I) apresenta partículas bidimensionais escamosas, de tamanho comparável ao H.

5.3. Reprodutibilidade dos Ensaio

O resultados dos diferentes ensaios para as misturas A1, A2 e A3 estão consolidados na tabela 22.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios para as misturas de controle (A1, A2 e A3)

Mistura	Densidade Aparente (g/cm ³)	Escoabilidade (s/50g)	Compressibili- dade (g/cm ³)	Força de Extração (N)	Resist. a Verde (MPa)
A1	2,70 ± 0,01	33,84 ± 0,36	6,52 ± 0,05	5,06 ± 0,11	16,9 ± 1,1
A2	2,66 ± 0,02	34,57 ± 0,10	6,56 ± 0,02	4,87 ± 0,28	16,1 ± 0,5
A3	2,68 ± 0,01	33,93 ± 0,10	6,54 ± 0,03	4,55 ± 0,35	16,7 ± 0,5

Verifica-se que os ensaios de densidade aparente e compressibilidade apresentam boa reprodutibilidade, com pequena variação entre os resultados das três misturas.

O ensaio de escoabilidade apresentou variação um pouco maior entre os resultados, o que esperava-se deve à imprecisão da medida de cronometragem em relação aos instrumentos de medição utilizados nos demais ensaios.

A força de extração apresentou resultados com certa variação, porém praticamente iguais quando se leva em consideração o seu desvio. Esta variabilidade maior de resultados pode ser verificada também através dos valores da carga de extração das barras para ruptura transversal apresentados no Anexo 4.

O resultado da resistência a verde das três misturas é igual considerando-se o seu desvio.

5.4. Propriedades das Misturas

5.4.1. Densidade Aparente

Todas as misturas apresentaram densidade aparente maior ou igual à do pó de ferro sem lubrificante (G). Quanto aos diferentes tipos de lubrificante, verifica-se que o lubrificante compósito Kenolube P11 (mistura H) e os lubrificantes do tipo cera (misturas A e B) praticamente não alteram a densidade aparente do pó de ferro, como pode ser observado na figura 34. Os lubrificantes do tipo estearato de metal (misturas E, F e I) apresentam densidade aparente significativamente maior (até 10%) que os descritos anteriormente. Os demais lubrificantes compósitos (misturas C e D) apresentam densidade aparente de intermediária para alta. Este comportamento está condizente com o esperado.

Sob o ponto de vista de densidade aparente os melhores lubrificantes são o Estearato de Zinco paranaense (E) e o 135 (F).

5.4.2. Escoabilidade

A presença de lubrificante teve três efeitos distintos na escoabilidade, que podem ser visualizados na figura 35. Os lubrificantes do tipo estearato de metal (E, F e I) e os compósitos (C e D), excetuando-se o Kenolube P11 (H), apresentam uma tendência a aumentar a escoabilidade do pó de ferro, ou seja diminuir o tempo de escoamento da amostra. Os lubrificantes do tipo cera reduzem significativamente - acima de 12% - a escoabilidade do pó de ferro. A mistura com o lubrificante Kenolube P11 aderiu à parede do funil de Hall, indicando ausência de escoamento livre para esta mistura. Como esperado, as misturas que apresentaram densidade aparente inferior tiveram menor escoabilidade.

Em relação à escoabilidade, os melhores lubrificantes são Caplube G (C), Ferrolube M (D), Estearato de Zinco paranaense (E), Estearato de Zinco 135 (F) e Stavisor Zinc E (I).

5.4.3. Compressibilidade e Compactação das Misturas

Em relação à compressibilidade, ensaiada pela compactação de anéis à mesma pressão de compactação, verificou-se que a adição de 0,75% de lubrificante levou a um aumento considerável da compressibilidade. Nota-se, na figura 36, uma tendência dos lubrificantes tipo estearato de metal aumentarem mais a compressibilidade que os lubrificantes tipo cera, com os lubrificantes compósitos apresentando valor intermediário, o que é condizente com os resultados da densidade aparente.

Em termos de compressibilidade, o melhor lubrificante é o Estearato de Zinco 135.

A adição de 0,75% de lubrificante conduziu a uma redução da pressão de compactação necessária para produzir barras para ruptura transversal com densidade de $6,55 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ (figuras 38 a 42). Os lubrificantes Ceracer - controle I e II (A2 e A3), Kenolube P11 (H) e Stavisor Zinc E (I) apresentaram pressão de compactação inferior a 450 MPa para atingir esta densidade. Porém, verificou-se uma variação de densidade a verde para a mesma pressão de compactação (devido à ausência de controle preciso da velocidade de aplicação de carga durante a compactação), o que torna esta análise imprecisa.

Comparando-se as pressões de compactação x densidade a verde atingidas para anéis (ensaio de compressibilidade) e barras (ensaio de resistência) - figuras 38 a 42, nota-se que os anéis apresentam uma maior pressão de compactação necessária para atingir uma densidade semelhante à das barras. Este comportamento é justificado pela maior área superficial do anel, que gera maior atrito com a matriz e o punção, reduzindo a pressão efetivamente aplicada ao pó.

5.4.4. Força de Extração

A força de extração foi reduzida pela presença de lubrificante, como pode ser notado na figura 37. Entretanto, não houve variação significativa da força de extração com os diferentes tipos de lubrificante tendo em vista os valores dos desvios, apenas com o lubrificante Caplube G (C) apresentando força de extração um pouco maior. A grande dispersão de resultados pode ser decorrente da dificuldade de controle da velocidade de extração - é manual. O equipamento utilizado não é adequado para este ensaio.

5.4.5. Resistência a Verde

A resistência a verde é diminuída de modo significativo pela presença de lubrificante, como observa-se na figura 43. As misturas com os diferentes tipos de lubrificante apresentam resistência a verde semelhante, a não ser os lubrificantes Allwax (B) e Kenolube P11 (H) que apresentam resistência a verde superior. Isto era esperado devido à baixa densidade aparente destas misturas.

5.4.6. Resistência do Sinterizado

Os lubrificantes tipo ceras (A e B), tipo estearato de metal (E, F e I) e Caplube G (C) apresentaram queda da resistência do sinterizado quando comparados ao pó de ferro. Esta queda foi mais sensível para os lubrificantes do tipo estearato de metal e Caplube G. Entretanto, comparando-a ao efeito de estearato de bário e cálcio na resistência do sinterizado (figura 17), nota-se que esta queda não é muito grande.

Os lubrificantes compósitos Ferrolube M (D) e Kenolube P11 (H) apresentaram resistência do sinterizado superior às demais misturas e à mistura de referência (G).

5.4.7. Variação Volumétrica e Variação de Densidade na Sinterização

A presença de lubrificante aumenta a redução volumétrica na sinterização, o que era esperado pois o lubrificante ocupa uma grande fração volumétrica na mistura e é queimado na sinterização.

Na sinterização ocorre um balanço entre a redução de peso do compactado pela queima do lubrificante e redução das películas de óxidos, e a redução volumétrica do compactado na sinterização pela contração dos poros. Este balanço determina a variação da densidade nesta operação: caso a redução de peso seja relativamente maior que a volumétrica, há redução da densidade.

As misturas com lubrificante tipo estearato de metal (E, F e I) apresentaram menor incremento na variação volumétrica de contração que os demais lubrificantes, apresentando inclusive queda da densidade na sinterização, ou seja a redução do volume não foi suficiente para compensar a redução de peso.

Os lubrificantes compósitos e do tipo cera tiveram maior redução de volume na sinterização, com a densidade mantendo-se constante ou aumentando na sinterização.

5.4.8. Dureza Aparente

A adição de lubrificante promoveu aumento da dureza aparente das misturas. Os lubrificantes do tipo estearato de metal (E, F e I) apresentaram tendência a aumentar menos a dureza que os demais. Isto é coerente com os resultados de resistência do sinterizado (apresentaram resistência baixa), com exceção da mistura Ceracer (A1), que apresentou resistência intermediária e dureza elevada.

Verifica-se que as misturas que apresentaram maior contração volumétrica na sinterização têm dureza aparente superior, o que é esperado pela sua maior densificação, diminuindo o efeito da porosidade na indentação.

Quanto à dureza aparente, os melhores lubrificantes são: Ceracer (A1) e Ferrolube M (D).

5.4.9. Micrografias

Verificou-se que os corpos de prova apresentaram variação de densidade ao longo da seção, e, portanto, variação do teor de porosidade, dificultando a sua caracterização.

A mistura Ceracer (A1) apresentou porosidade aglomerada (figura A8/1), extremamente prejudicial às propriedades do sinterizado. As misturas Caplube G (C), Ferrolube M (D) e Estearato de Zinco paranaense (E) apresentaram porosidade fina e bem distribuída (figuras A8/3 a A8/5), o que proporciona melhores propriedades do produto sinterizado.

6. Conclusão

O resultado consolidado dos ensaios realizados é apresentado na tabela 23.

Tabela 23 - Resultado consolidado dos ensaios realizados nas misturas

Ensaio	Resultado
Partícula Lubrificante	Partículas Finas: E Partículas mais Grosseiras: A1
Densidade Aparente	Melhores lubrificantes: E e F Bons resultados - lubrificantes: C e D
Escoabilidade	Melhores lubrificantes: C, D, E, F e I Não escoou: H
Compressibilidade	Melhor lubrificante: F
Força de Extração	Ensaio Prejudicado
Resistência a Verde	Melhores lubrificantes: B e H
Resistência do Sinterizado	Melhores lubrificantes: D e H
Contração na Sinterização	Maior contração: D Bons resultados - lubrificantes: A1, B e C
Dureza	Melhores lubrificantes: A1 e D Bons resultados - lubrificantes: C, E e H
Metalografia	Porosidade fina e bem distribuída: C, D e E Mistura A apresentou porosidade aglomerada

A1	Ceracer	E	Estearato de Zinco paranaense
A2	Ceracer - controle I	F	Estearato de Zinco 135
A3	Ceracer - controle II	G	DS 205 sem lubrificante - referência
B	Allwax	H	Kenolube P11
C	Caplube G	I	Stavinor Zinc E
D	Ferrolube M		

Em termos de resistência a verde, os melhores lubrificantes, para o teor de 0,75 % (determinado por experiência prévia), são o Allwax (B) e Kenolube P11 (H).

Em termos de resistência do sinterizado, os lubrificantes Ferrolube M (D) e Kenolube P11 (H) apresentaram os melhores resultados. Destes lubrificantes, o Ferrolube M apresentou melhor escoabilidade e maior densidade aparente e compressibilidade. Portanto, dentre os lubrificantes ensaiados, considerando-se o teor de 0,75 % de lubrificante, verifica-se que o lubrificante Ferrolube M apresentou, no todo, os melhores resultados.

O lubrificante Kenolube P11 (H) apresentou-se como segunda opção, desde que problema de falta de escoabilidade seja sanado, o que pode ser feito através de uso de menores teores de lubrificantes ou de processos de mistura diferentes.

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

A operação de mistura é fundamental para as propriedades do pó e do sinterizado. Deste modo, sugere-se o estudo da influência desta operação nas propriedades discutidas neste estudo.

Sugere-se, também, a caracterização das propriedades do sinterizado a uma densidade mais alta, como $6,80 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ para verificar a influência da densidade nestas propriedades e alterações relativas entre o comportamento dos lubrificantes.

8. Referências Bibliográficas

1. CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó: Técnicas e Produtos. São Paulo, ABM, 1992. p. 6, 31-39.
2. METALLNORMCENTER. Powder Metallurgy. Estocolmo, MNC, 1978. p. 72, 88-94.
3. AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. ASM Handbook. Cleveland, ASM, 1993. v. 7. p. 190-191, 286.
4. HIRSCHHORN, J. S. Introduction to Powder Metallurgy. Princeton, American Powder Metallurgy Institute, 1976.
5. SUH, S.; PATEL, S. A Study of Compressibility, Green and Sintered Strength of Iron Powders. In: INTERNATIONAL CONFERENCE EXHIBITION ON POWDER METALLURGY, Chicago, 1991. Proceedings. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1991. v. 5, p. 151-160.
6. AESOPH, M. D.; GURSON, A. L. Relationships Between Lubricant Content, Compaction Pressure, Metal Volume Fraction, Bend Strength and Elastic Modulus in Green Compacts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE EXHIBITION ON POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIALS, Westin Harbour, 1994. Proceedings. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1994. v. 3, p. 57-69.
7. HALLHAGEN, K.; THORNBLAD, O.; STORSTRÖM, H. The Influence of Lubricants in Powder Compaction. In: 1997 EUROPEAN CONFERENCE ON ADVANCES IN STRUCTURAL PM COMPONENT PRODUCTION, Munique, 1997. Proceedings. Munique, European Powder Metallurgy Association, 1997. p. 59-69.
8. ARIMA, S. et al. Effect of Lubricant Chemistry on Green Strength. In: INTERNATIONAL CONFERENCE EXHIBITION ON POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIALS, Westin Harbour, 1994. Proceedings. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1994. v. 3, p. 91-101.
9. GERMAN, R. Powder Metallurgy Science. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1994.
10. THÜMMER, F.; OBERACKER, R. Introduction to Powder Metallurgy. Londres, The Institute of Materials, 1993.
11. HAUSNER, H. H. Handbook of Powder Metallurgy. Nova Iorque, Chemical Publishing Co. Inc., 1973. p. 126-143.
12. BELGO BRASILEIRA. Especificação de Produto - Trifer DS 205: Catálogo. 1997.

13. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Especificação de Pó de Ferro Tifer DS 205:** N°. EM - 005/01. Indaiatuba, 1996.
14. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Amostragem e Ensaios para Recebimento de Matérias-Primas em Forma de Pó:** N°. LA 5:022. Indaiatuba, 1995.
15. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Determinação da Densidade Aparente de Pós Metálicos:** N°. LA 5:009. Indaiatuba, 1995.
16. ASTM. **Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders:** B 212-89. Philadelphia, 1991.
17. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Determinação da Escoabilidade de Pós Metálicos:** N°. LA 5:010. Indaiatuba, 1995.
18. ASTM. **Test Method for Flow Rate of Metal Powders:** B 213-90. Philadelphia, 1991.
19. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Determinação da Compressibilidade de Pós Metálicos:** N°. LA 5:018. Indaiatuba, 1995.
20. ASTM. **Test Method for Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction:** B 331-85 (89). Philadelphia, 1991.
21. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Preparação e Operação da Máquina de Ensaios de Tração e Compressão KRATOS:** N°. LA 5:015. Indaiatuba, 1995.
22. **PÓS METÁLICOS - MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA COMPRESSIBILIDADE (COMPACTABILIDADE) DE PÓS METÁLICOS:** Projeto de Norma ABNT: 1:401.05-013, s. l., 1992.
23. METAL LEVE SINTERIZADOS. **Análise Granulométrica:** N°. LA 5:023. Indaiatuba, 1995.
24. ASTM. **Test Method for Sieve Analysis of Granular Metal Powders:** B 214-86. Philadelphia, 1991.
25. **PÓS METÁLICOS - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A VERDE - MÉTODO DE RUPTURA TRANSVERSAL:** Projeto de Norma ABNT: 1:401.05-014, s. l., 1992.
26. GOMES, U. U. Tecnologia dos Pós - Fundamentos e Aplicações. Natal, UFRN Editora Universitária, 1995. p. 28, 41.
27. Hoegenaes unveils higher green strength powder family. Metal Powder Report, v. 52, n. 9, p. 26-27, Set. 1997.
28. MPIF. Powder Metallurgy: Design Solutions. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1993, p. 10-11.

Anexo 1:

Caracterização do Pó de Ferro

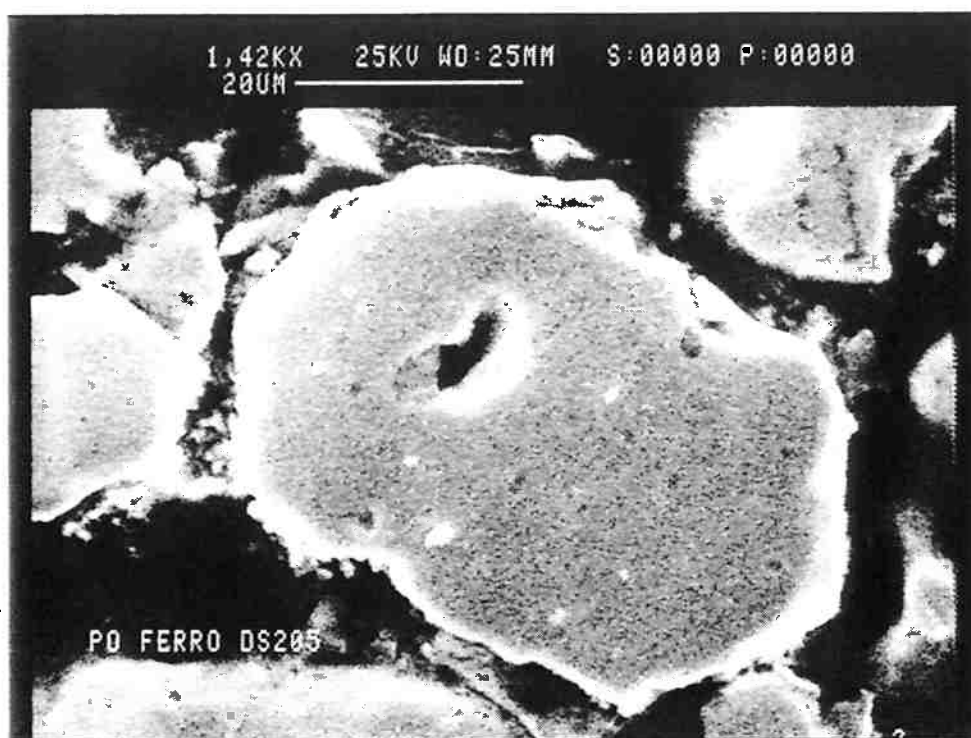


Figura A1/1 - Particula do pó de ferro DS 205 polida observada no MEV mostrando porosidade interna

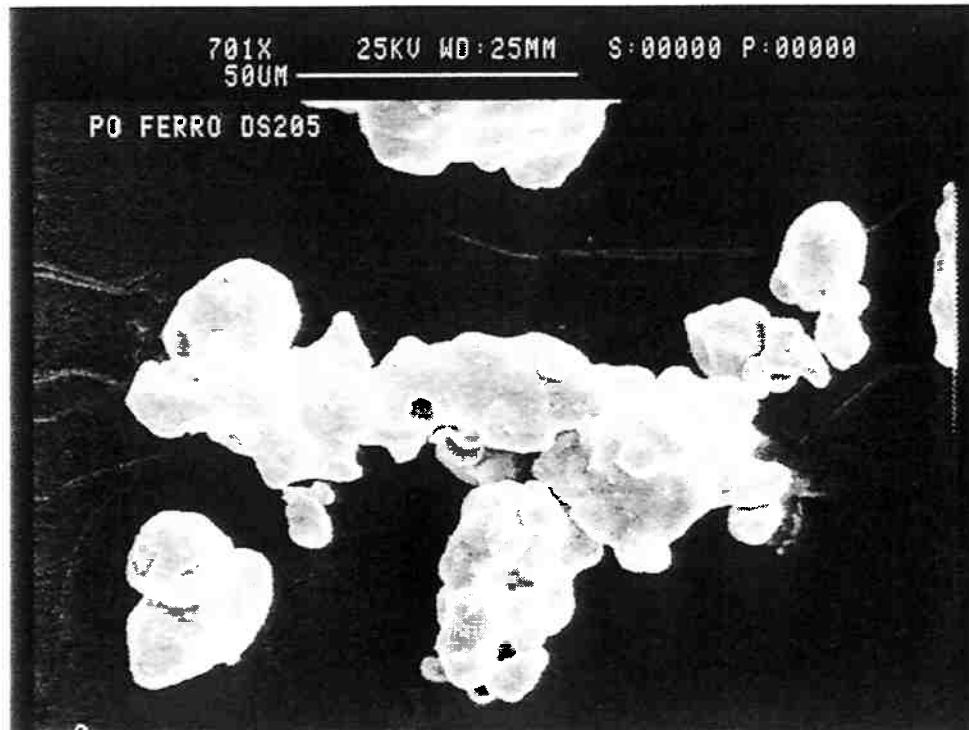


Figura A1/2 - Partículas alongadas do pó de ferro DS 205 observada no MEV

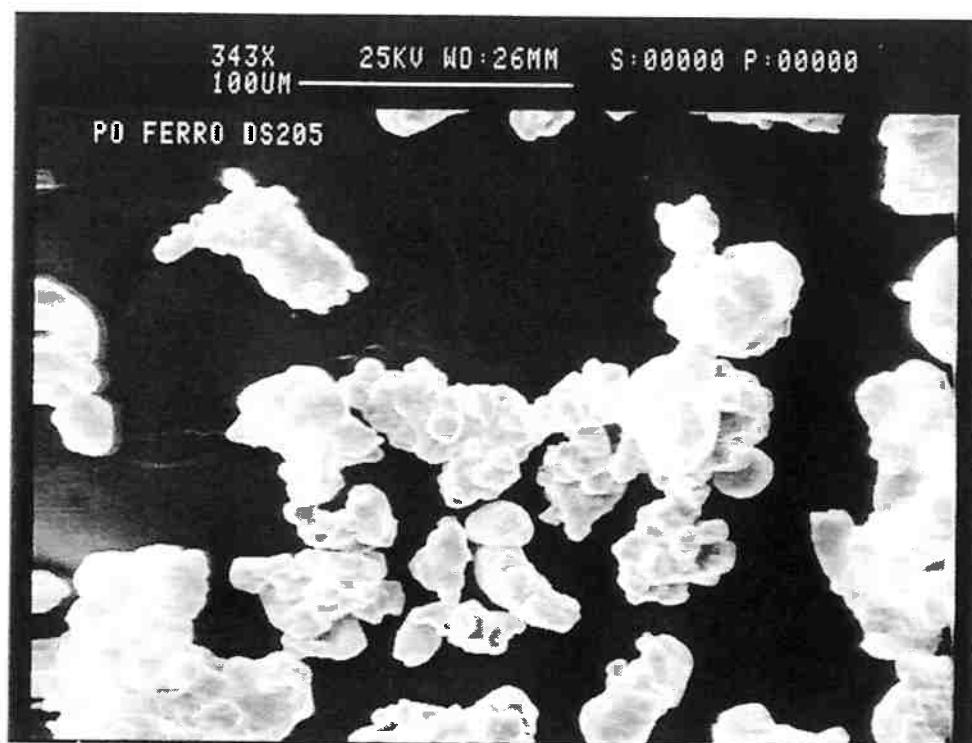


Figura A1/3 - Partículas alongadas do pó de ferro DS 205 observada no MEV

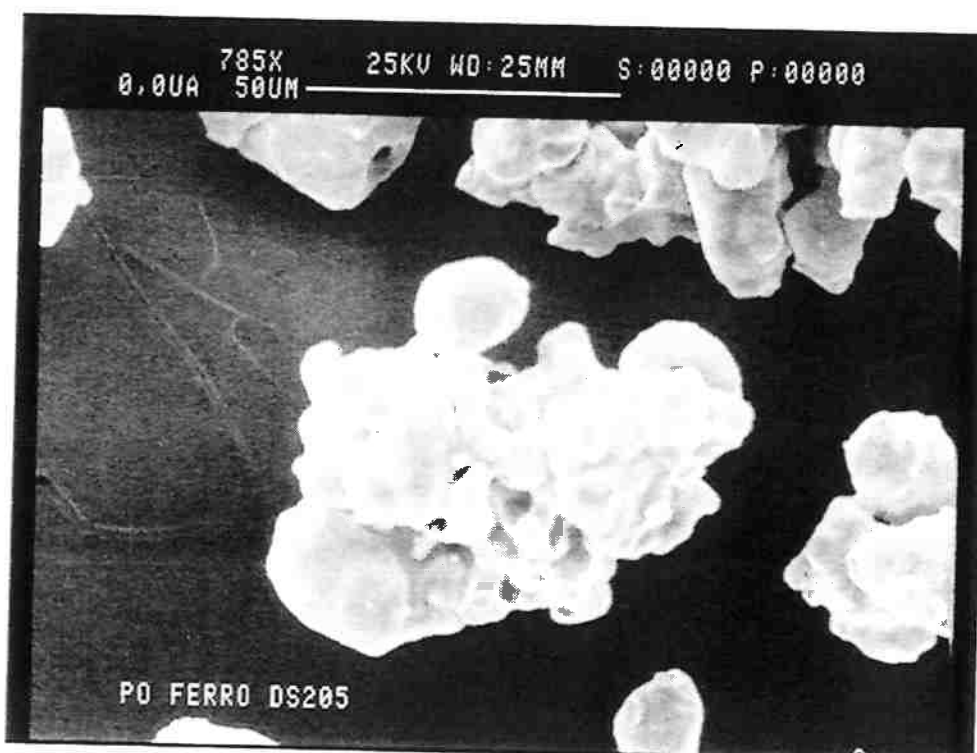


Figura A1/4 - Partícula equiaxial do pó de ferro DS 205 observada no MEV



Figura A1/5 - Impureza presente no pó de ferro DS 205



Figura A1/6 - Impureza presente no pó de ferro DS 205, possivelmente proveniente do polimento



Figura A1/7 - Impureza presente no pó de ferro DS 205

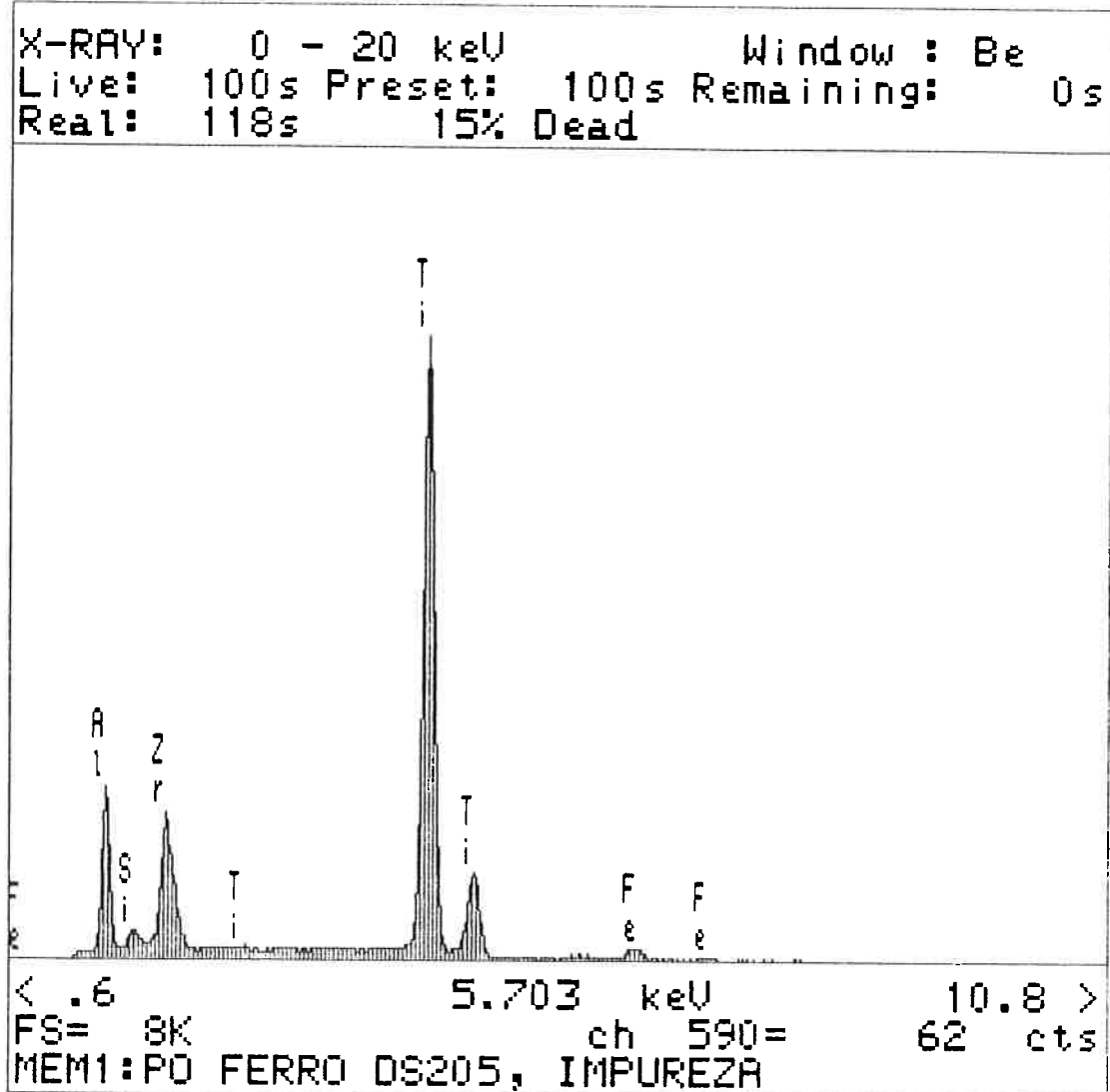


Figura A1/8 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/5

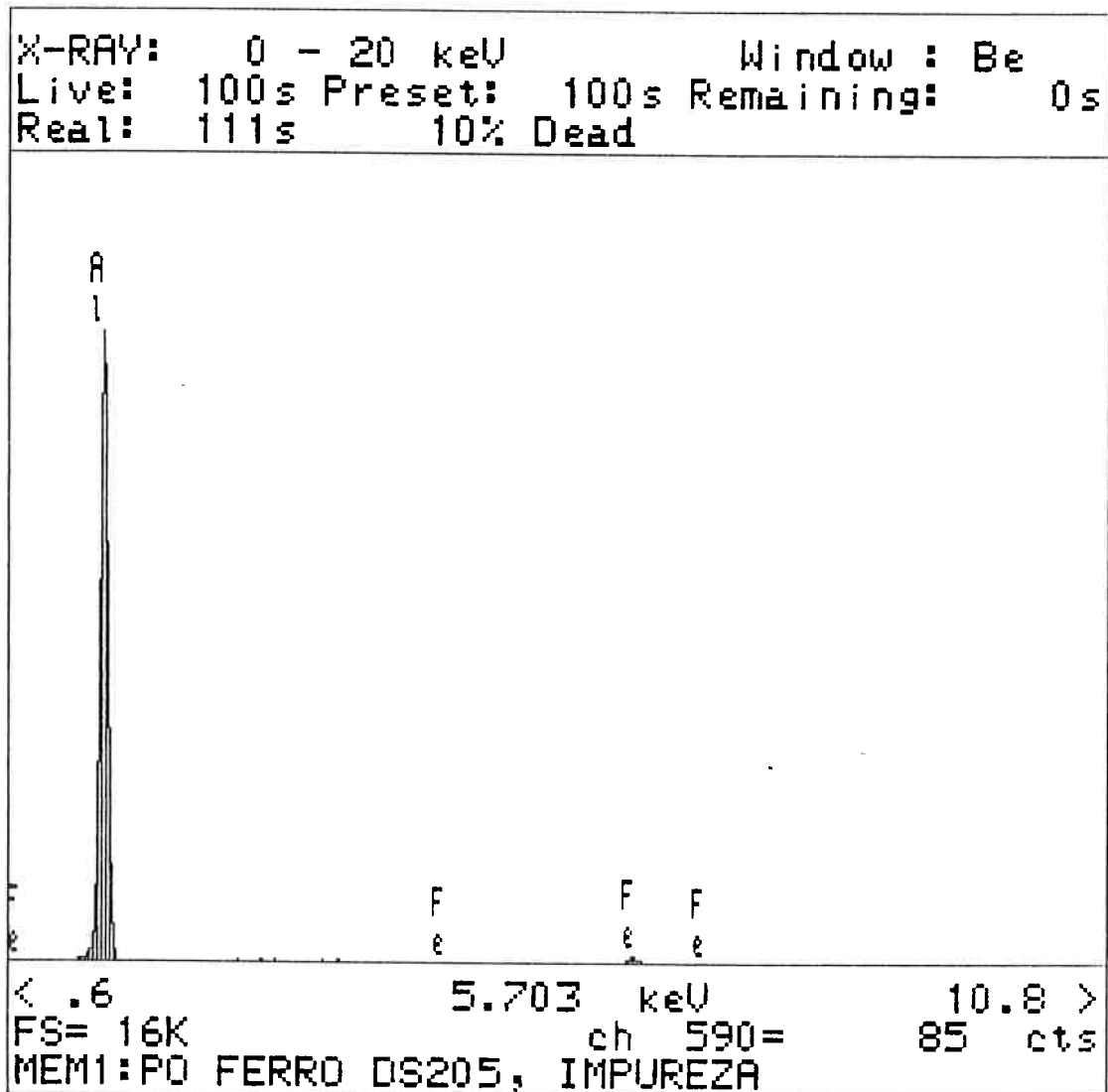


Figura A1/9 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/6

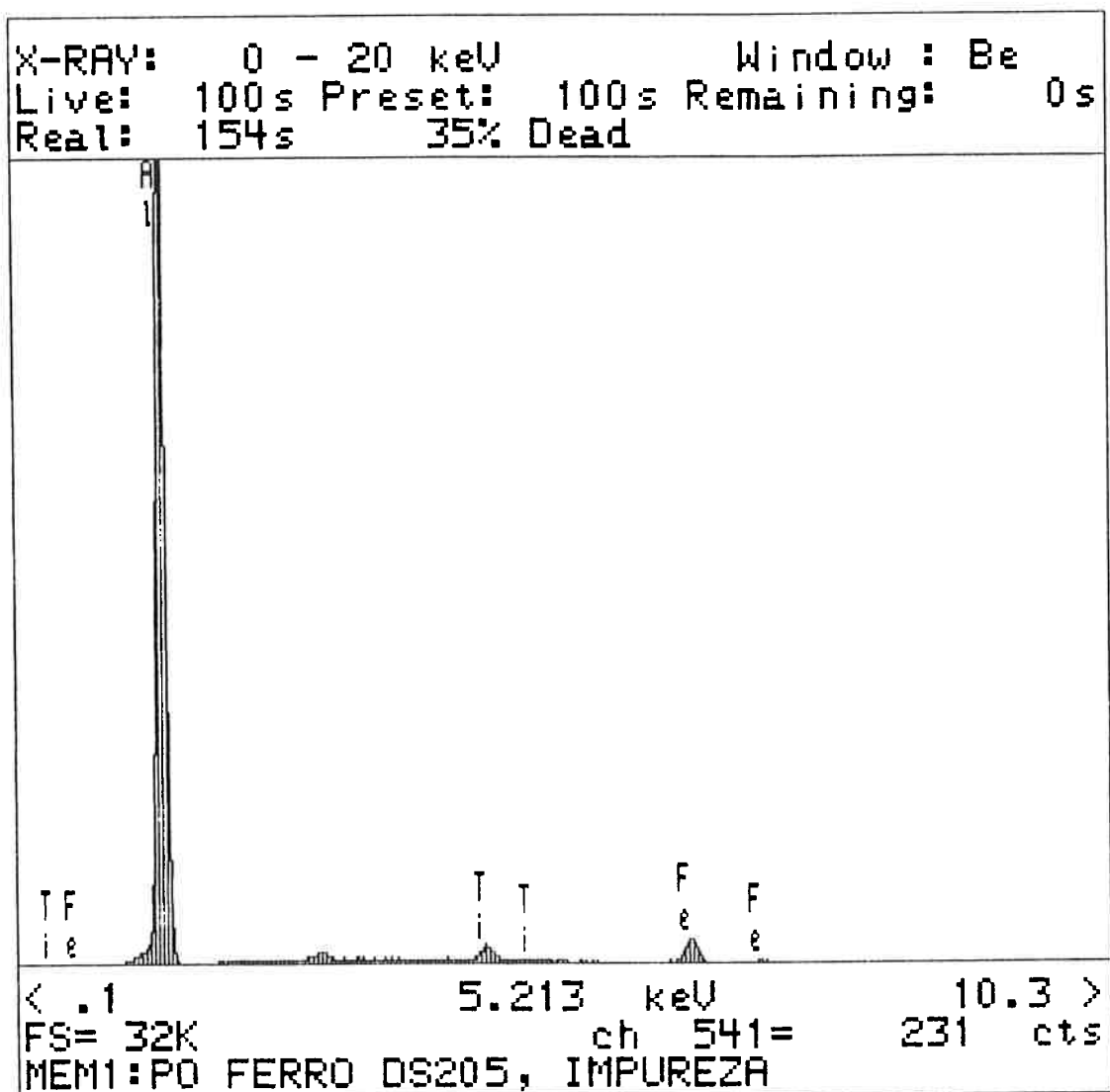


Figura A1/10 - Análise química (EDS) da impureza da figura A1/7

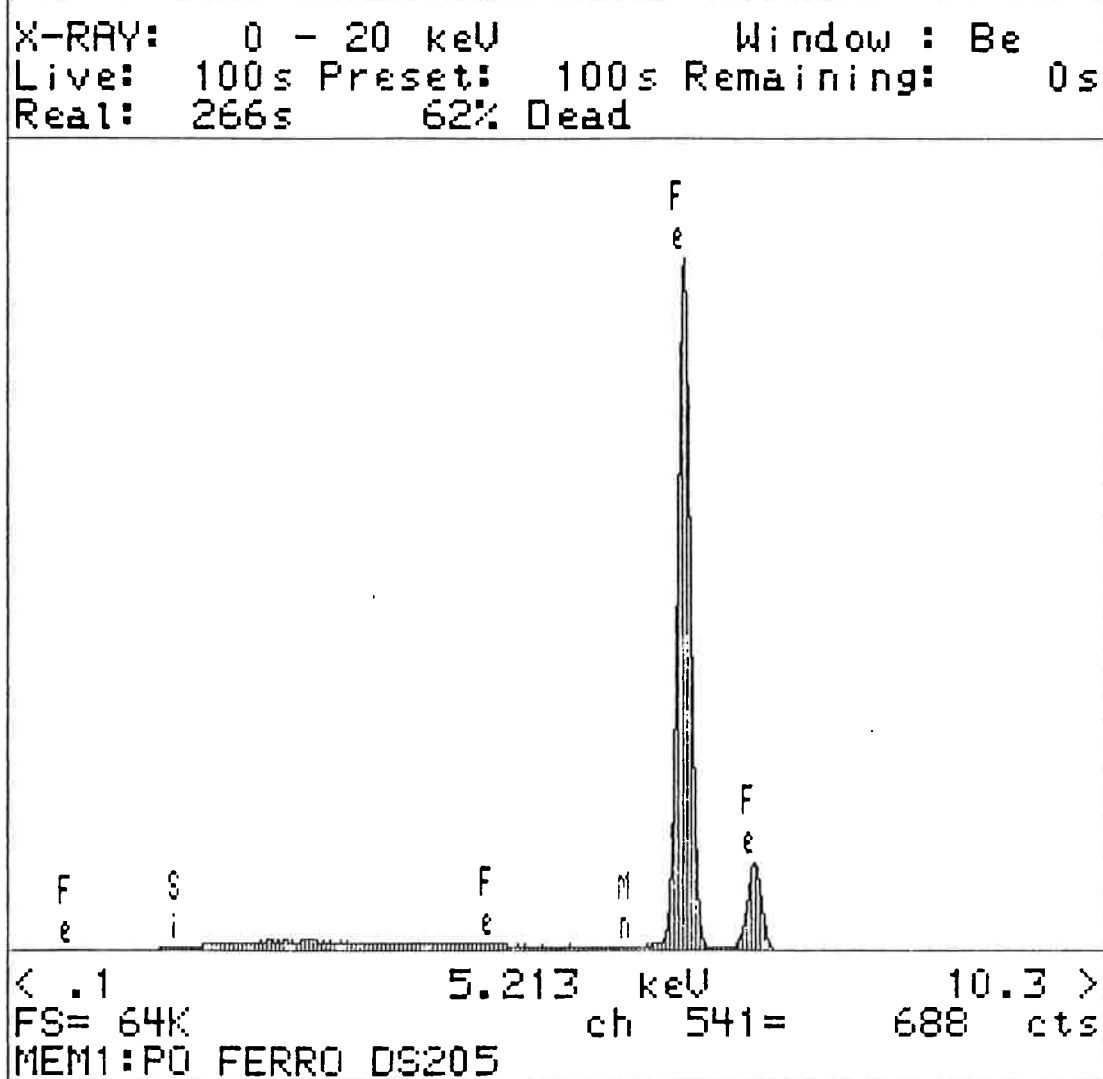


Figura A1/11 - Análise química (EDS) do pó de ferro DS 205

Anexo 2:

Caracterização dos Lubrificantes

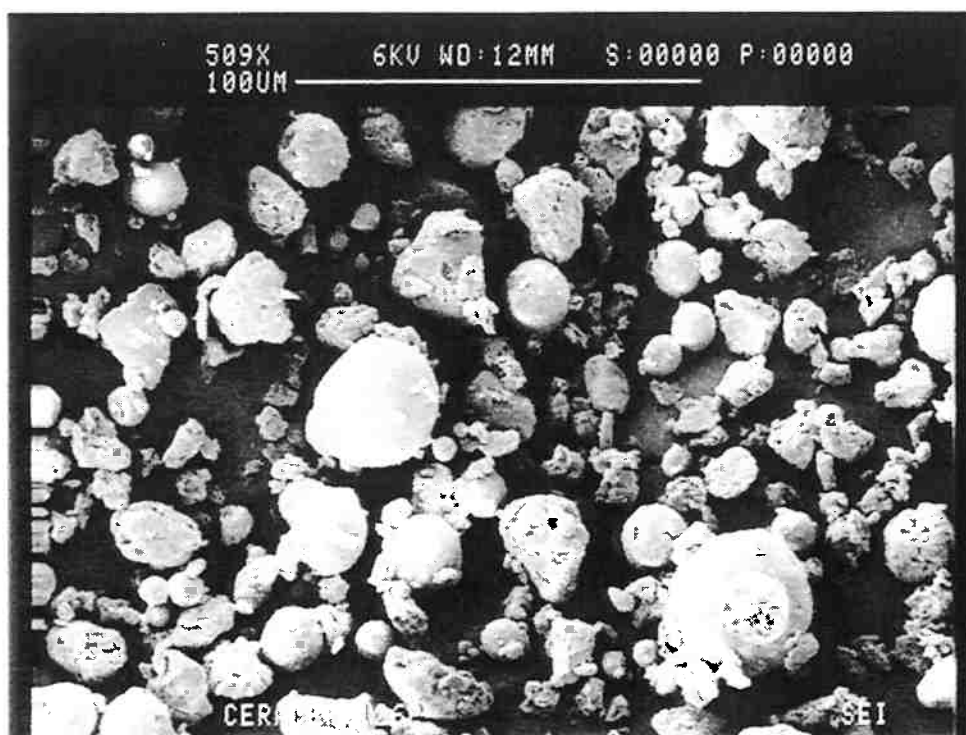


Figura A2/1 - Partículas do lubrificante Ceracer 126P (A)

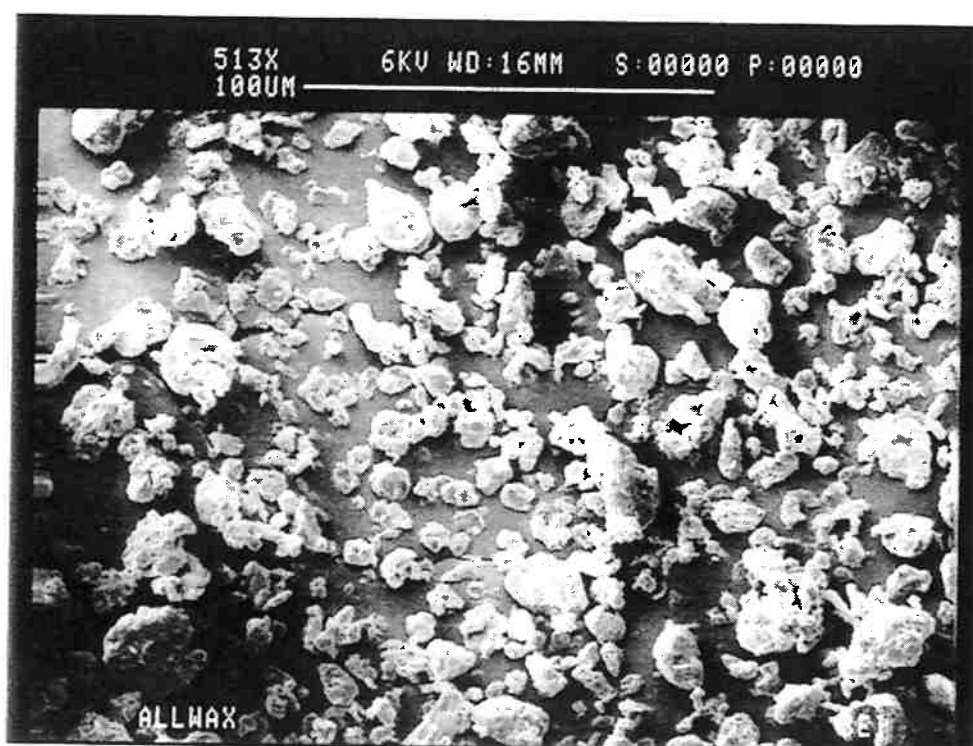


Figura A2/2 - Partículas do lubrificante Allwax (B)

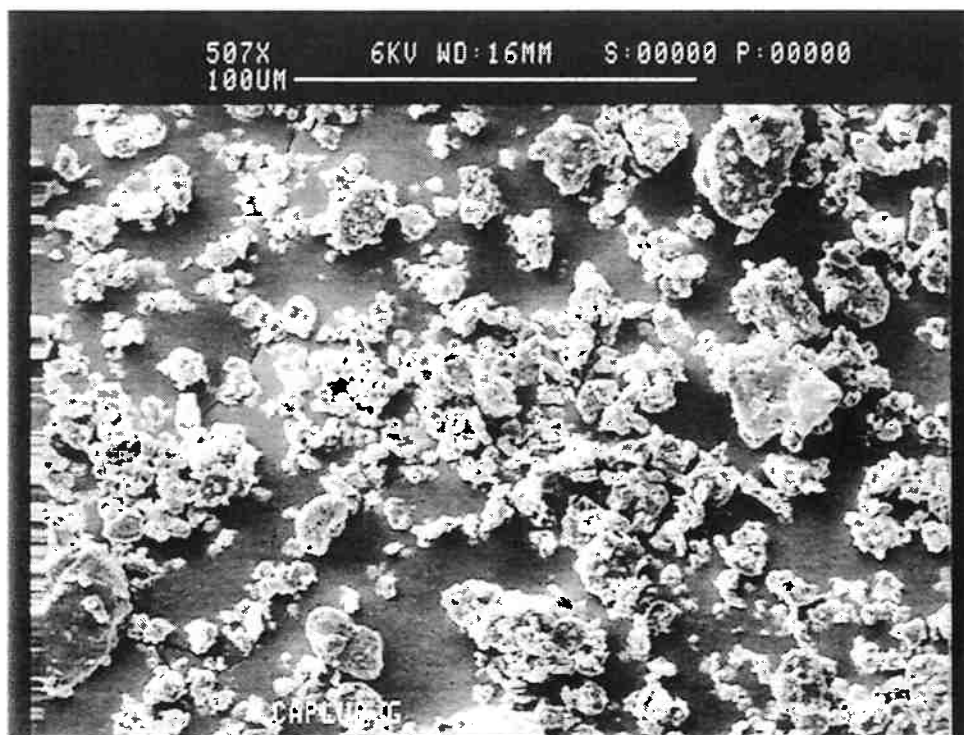


Figura A2/3 - Partículas do lubrificante Caplube G (C)

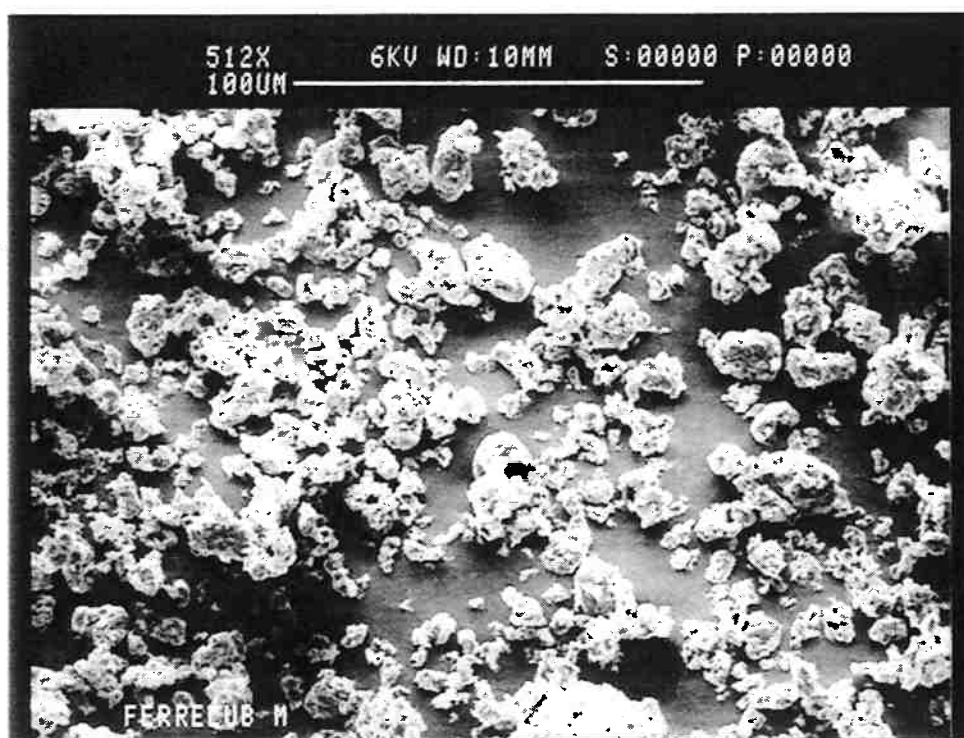


Figura A2/4 - Partículas do lubrificante Ferrolube M (D)

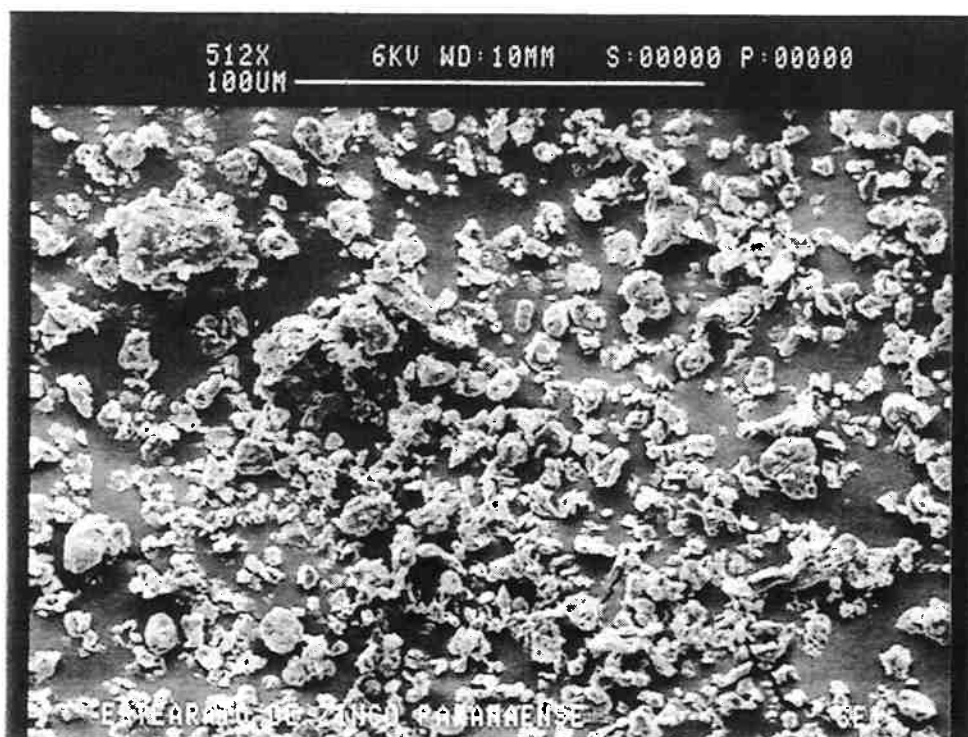


Figura A2/5 - Partículas do lubrificante Estearato de Zinco paranaense (E)

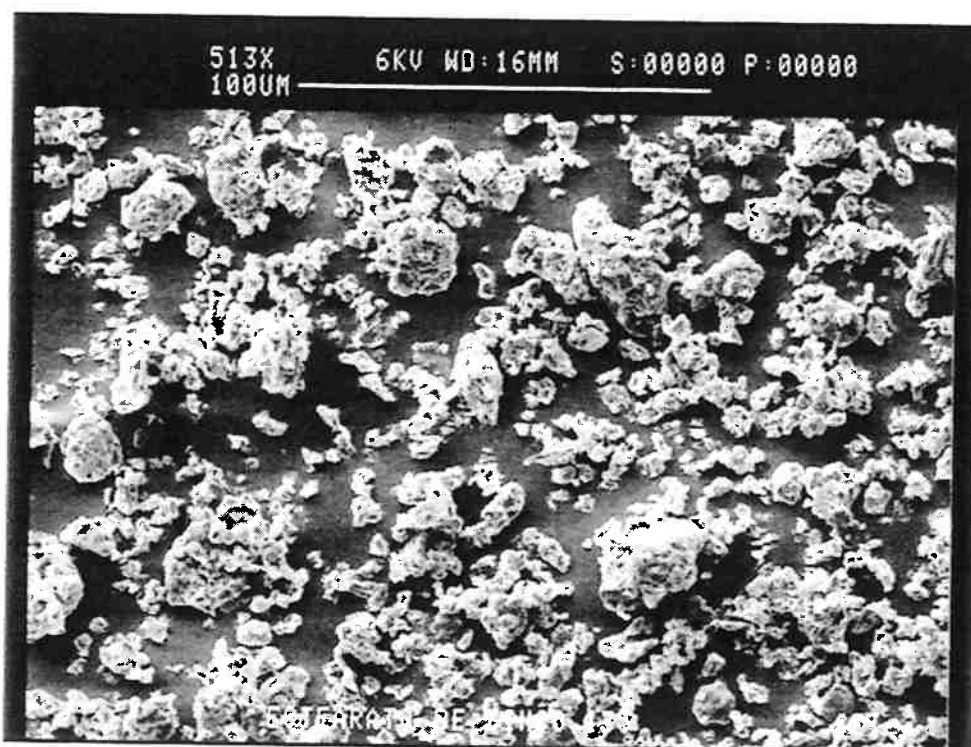


Figura A2/6 - Partículas do lubrificante Estearato de Zinco 135 (F)

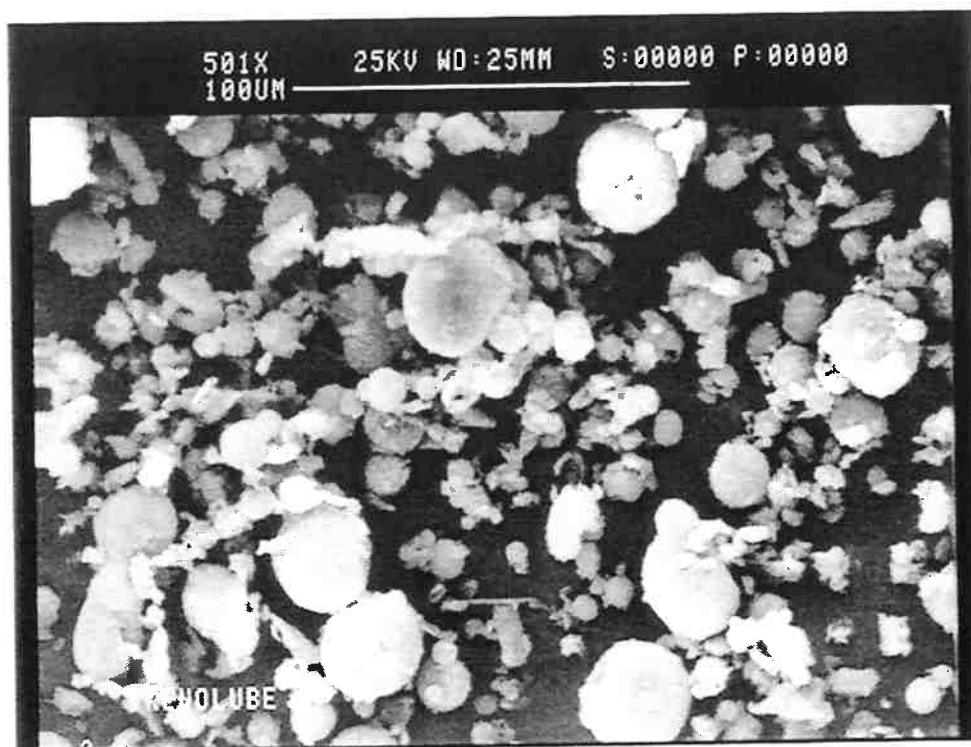


Figura A2/7 - Partículas do lubrificante Kenolube P11 (H)

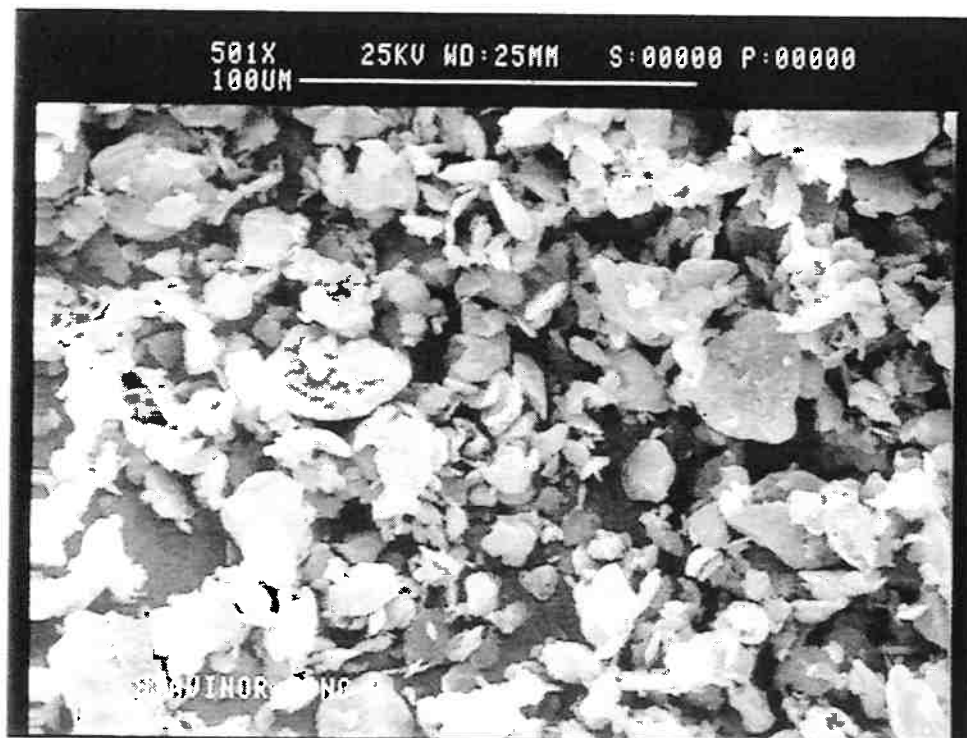


Figura A2/8 - Partículas do lubrificante Stavisor Zinc E (I)

Anexo 3:

Compresibilidade e Força de Extração

Nas tabelas a seguir estão apresentados os dados de cada corpo de prova do ensaio de compressibilidade e força de extração das misturas. Adotou-se as seguintes abreviações:

- Carga Ext.: carga de extração dos anéis compactados;
- Pressão: pressão de compactação;
- Espes.: espessura do compactado;
- D. ext./D. int.: diâmetros externo e interno dos anéis; e
- FE: força de extração do compactado.

Tabela A3/1 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A1

Mistura: A1) Ceracer										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.040	23.040	6.450	463,5	29,3294	0,8783 0,8965	3,0089 3,0073	1,6220	6,56	50,2
2	2.010	23.040	6.450	463,5	29,1195	0,8925 0,8970	3,0066 3,0077	1,6215	6,46	49,7
3	2.010	23.010	6.630	462,9	29,1747	0,8768 0,8910	3,0077 3,0071	1,6205	6,55	51,8
Média									6,52	50,6
Desvio									0,05	1,1

Tabela A3/2 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A2

Mistura: A2) Ceracer - Controle I										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	22.980	6.390	462,3	29,3596	0,8874 0,8850	3,0080 3,0083	1,6215	6,57	49,8
2	2.010	23.040	5.910	463,5	29,5621	0,8975 0,8952	3,0084 3,0071	1,6220	6,55	45,5
3	2.010	22.980	6.510	462,3	29,3584	0,8812 0,8901	3,0080 3,0088	1,6220	6,57	50,7
Média									6,56	48,7
Desvio									0,02	2,8

Tabela A3/3 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura A3

Mistura: A3) Ceracer - Controle II										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	22.980	6.360	462,3	29,6759	0,8932 0,9010	3,0065 3,0068	1,6225	6,57	48,9
2	2.010	23.040	5.490	463,5	29,6872	0,9126 0,8984	3,0076 3,0060	1,6220	6,51	41,8
3	2.010	23.010	5.880	462,9	29,2942	0,8819 0,8951	3,0049 3,0089	1,6215	6,55	45,7
Média									6,54	45,5
Desvio									0,03	3,5

Tabela A3/4 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura B

Mistura: B) Allwax										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.040	23.040	6.570	463,5	29,4345	0,9014 0,8982	3,0064 3,0071	1,6225	6,50	50,4
2	2.010	23.010	6.840	462,9	29,7766	0,9160 0,9015	3,0080 3,0073	1,6225	6,51	51,9
3	2.040	23.040	6.660	463,5	29,9355	0,9193 0,9018	3,0080 3,0076	1,6225	6,53	50,5
Média									6,51	50,9
Desvio									0,01	0,9

Tabela A3/5 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura C

Mistura: C) Caplube G										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	23.100	8.910	464,7	30,9825	0,9353 0,9512	3,0066 3,0091	1,6230	6,52	65,2
2	2.040	22.980	7.650	462,3	31,2489	0,9516 0,9391	3,0082 3,0075	1,6225	6,56	55,8
3	2.010	22.980	7.500	462,3	31,0957	0,9495 0,9436	3,0088 3,0100	1,6240	6,52	54,7
Média									6,53	58,6
Desvio									0,02	5,8

Tabela A3/6 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura D

Mistura: D) Ferrolube M										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	23.010	6.960	462,9	30,8893	0,9329 0,9439	3,0081 3,0070	1,6220	6,53	51,2
2	2.010	23.010	7.110	462,9	30,9075	0,9363 0,9321	3,0077 3,0072	1,6220	6,57	52,5
3	2.040	22.980	7.530	462,3	30,9350	0,9383 0,9282	3,0081 3,0063	1,6220	6,58	55,7
Média									6,56	53,1
Desvio									0,02	2,3

Tabela A3/7 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura E

Mistura: E) Estearato de Zinco paranaense										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	23.040	6.720	463,5	31,1558	0,9526 0,9501	3,0085 3,0076	1,6220	6,50	48,7
2	2.040	22.980	6.840	462,3	31,1037	0,9296 0,9385	3,0067 3,0089	1,6220	6,61	50,5
3	2.010	22.980	7.110	462,3	31,4484	0,9450 0,9430	3,0078 3,0073	1,6220	6,61	52,0
									Média	6,57
									Desvio	0,07
										50,4
										1,6

Tabela A3/8 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura F

Mistura: F) Estearato de Zinco 135										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	1.980	22.980	6.000	462,3	31,6839	0,9641 0,9546	3,0083 3,0086	1,6215	6,55	43,2
2	2.010	23.010	7.470	462,9	32,6628	0,9749 0,9838	3,0074 3,0087	1,6280	6,64	52,6
3	2.010	23.040	7.440	463,5	32,3233	0,9683 0,9697	3,0088 3,0089	1,6270	6,63	53,0
									Média	6,61
									Desvio	0,05
										49,6
										5,6

Tabela A3/9 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura G

Mistura: G) DS 205										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	1.980	23.010	9.540	462,9	28,5813	0,8845 0,9031	3,0062 3,0081	1,6220	6,35	73,7
2	2.070	23.070	10.200	464,1	28,8342	0,8918 0,9082	3,0076 3,0071	1,6220	6,36	78,2
3	2.040	23.070	10.020	464,1	28,8453	0,9055 0,9061	3,0074 3,0071	1,6220	6,32	76,3
									Média	6,34
									Desvio	0,02
										76,1
										2,3

Tabela A3/10 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura H

Mistura: H) Kenolube										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.010	23.070	6.780	464,1	29,5947	0,8913 0,9083	3,0078 3,0075	1,6215	6,53	52,0
2	2.010	23.040	6.810	463,5	29,4799	0,8904 0,9094	3,0067 3,0070	1,6215	6,51	52,2
3	2.010	22.980	6.900	462,3	29,8192	0,9215 0,9045	3,0074 3,0077	1,6215	6,48	52,1
									Média	6,50
									Desvio	0,02
										52,1
										0,1

Tabela A3/11 - Dados de compressibilidade e força de extração da mistura I

Mistura: I) Stavisor Zinc E										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Espes. (cm)	D. ext. (cm)	D. int. (cm)	Densidade (g/cm³)	FE (MPa)
1	2.040	22.980	6.270	462,3	31,1925	0,9541 0,9375	3,0072 3,0085	1,6225	6,55	45,7
2	2.010	22.980	7.380	462,3	31,6784	0,9512 0,9655	3,0087 3,0085	1,6220	6,55	53,1
3	2.040	23.010	6.900	462,9	31,2494	0,9387 0,9463	3,0074 3,0080	1,6220	6,58	50,5
									Média	6,56
									Desvio	0,02
										49,8
										3,7

Anexo 4:

Compactação

Nas páginas a seguir, são apresentados os dados da compactação das barras para ensaio de ruptura transversal. Nestas tabelas apresentam-se as cargas de compactação e extração, a pressão de compactação, o peso, as dimensões dos corpos de prova e a densidade calculada pelo valor médio das dimensões.

Os corpos de prova numerados em algarismos romanos identificam as amostras que foram utilizadas para o ensaio de resistência a verde. Os corpos de prova identificados com letras minúsculas foram utilizados para o ensaio de resistência do sinterizado. Já aqueles simplesmente numerados, não foram utilizados por estarem fora da densidade determinada ou por apresentarem variação de espessura acima da permitida para o ensaio de ruptura transversal. As amostras marcadas com asterisco foram compactadas após a lubrificação periódica da matriz, tendo sido descartadas.

Tabela A4/1 - Dados da compactação da mistura A1

Tabela A4/1 - Dados da compactação da mistura A1										
Mistura: A1) Ceracer										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)	
1	1.830	17.880	2.760	445,7	15,9829	1,272	3,179	0,610	6,49	
						1,271	3,177	0,604		
						1,271	3,179	0,616		
I	2.100	17.940	2.820	447,2	16,0048	1,272	3,179	0,605	6,53	
						1,271	3,180	0,610		
						1,272	3,179	0,603		
2	2.130	17.940	2.940	447,2	16,0070	1,273	3,178	0,604	6,56	
						1,271	3,179	0,603		
						1,271	3,179	0,604		
II	2.130	17.940	2.700	447,2	16,0072	1,272	3,179	0,606	6,54	
						1,272	3,179	0,608		
						1,272	3,179	0,603		
III	2.190	18.060	2.640	450,2	16,0145	1,275	3,181	0,601	6,52	
						1,273	3,180	0,608		
						1,274	3,180	0,611		
3	2.130	18.120	2.220	451,7	16,0087	1,2727	3,1807	0,6098	6,57	
						1,2705	3,1799	0,6019		
						1,2716	3,1793	0,5955		
a	2.130	18.120	2.040	451,7	15,9900	1,2715	3,1805	0,5959	6,58	
						1,2718	3,1804	0,6057		
						1,2718	3,1788	0,6009		
b	2.190	18.060	2.160	450,2	16,0080	1,2718	3,1800	0,6069	6,57	
						1,2722	3,1798	0,5973		
						1,2727	3,1778	0,6022		
c	2.100	18.060	2.100	450,2	16,0044	1,2715	3,1785	0,5992	6,60	
						1,2704	3,1793	0,6009		
						1,2718	3,1787	0,5994		

Tabela A4/2 - Dados da compactação da mistura A2

A2) Ceracer - Controle I									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.130	17.940	2.640	447,2	15,9996	1,271	3,178	0,606	6,54
						1,272	3,178	0,605	
						1,273	3,178	0,604	
II	2.130	17.940	2.880	447,2	16,0144	1,272	3,178	0,605	6,55
						1,271	3,178	0,604	
						1,271	3,178	0,607	
1	2.160	18.000	2.700	448,7	15,9993	1,272	3,178	0,609	6,50
						1,272	3,179	0,604	
						1,272	3,179	0,615	
III	2.100	17.940	2.730	447,2	15,9952	1,271	3,177	0,606	6,54
						1,270	3,179	0,607	
						1,272	3,179	0,603	

Tabela A4/3 - Dados da compactação da mistura A3

A3) Ceracer - Controle II								
Mistura:								
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Densidade (g/cm³)
1	2.130	17.940	1.860	447,2	16,0134	1,273 1,273 1,272	3,192 3,181 3,182	6,46
I	2.220	18.060	2.880	450,2	15,9996	1,274 1,273 1,273	3,180 3,180 3,180	6,53
II	2.130	18.030	2.910	449,4	15,9950	1,272 1,271 1,270	3,180 3,180 3,179	6,56
2	2.130	18.030	2.760	449,4	16,0036	1,272 1,272 1,271	3,185 3,186 3,186	6,49
III	2.160	18.030	2.790	449,4	16,0068	1,271 1,270 1,271	3,179 3,180 3,180	6,50

Tabela A4/4 - Dados da compactação da mistura B

B) Allwax										
Mistura:										
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)	
1	2.160	18.060	3.390	450,2	15,9771	1,271	3,181	0,610	6,47	
						1,272	3,180	0,617		
						1,271	3,181	0,604		
I	2.160	18.210	3.390	453,9	15,9993	1,273	3,180	0,607	6,51	
						1,271	3,180	0,603		
						1,272	3,179	0,613		
II	2.130	18.330	3.510	456,9	15,9931	1,272	3,179	0,606	6,52	
						1,273	3,179	0,612		
						1,273	3,180	0,602		
2	2.130	18.330	3.690	456,9	15,9988	1,272	3,179	0,611	6,48	
						1,271	3,179	0,606		
						1,270	3,179	0,616		
III	2.400	18.450	3.300	459,9	15,9995	1,272	3,179	0,611	6,53	
						1,271	3,180	0,601		
						1,273	3,180	0,605		
3	2.100	18.480	2.190	460,6	16,0001	1,2710	3,1793	0,5998	6,62	
						1,2715	3,1790	0,5958		
						1,2717	3,1785	0,5984		
a	2.130	18.390	1.980	458,4	15,9911	1,2723	3,1806	0,6023	6,60	
						1,2713	3,1786	0,5963		
						1,2713	3,1795	0,5993		
b	2.100	18.240	2.100	454,6	16,0026	1,2711	3,1791	0,6005	6,60	
						1,2708	3,1796	0,5999		
						1,2715	3,1786	0,6001		
c	2.130	18.120	2.160	451,7	15,9915	1,2708	3,1796	0,6000	6,59	
						1,2718	3,1784	0,6005		
						1,2712	3,1788	0,6014		

Tabela A4/5 - Dados da compactação da mistura C

C) Caplube G									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.130	18.000	2.610	448,7	16,0076	1,274 1,272 1,273	3,180 3,180 3,180	0,606 0,609 0,602	6,53
I*	2.190	18.120	1.860	451,7	15,9587	1,274 1,272 1,273	3,182 3,181 3,182	0,598 0,595 0,598	6,60
II	2.310	18.180	2.130	453,1	15,9931	1,270 1,273 1,270	3,179 3,179 3,180	0,601 0,605 0,596	6,59
III	2.100	18.090	2.160	450,9	15,9758	1,271 1,271 1,270	3,179 3,179 3,179	0,600 0,605 0,595	6,59
2	2.130	18.060	1.860	450,2	16,0222	1,2717 1,2720 1,2710	3,1790 3,1785 3,1784	0,6050 0,5970 0,6110	6,56
a	2.130	18.030	2.220	449,4	16,0252	1,2720 1,2719 1,2719	3,1793 3,1783 3,1785	0,6004 0,6094 0,6049	6,55
b	2.100	18.150	2.130	452,4	15,9989	1,2715 1,2719 1,2717	3,1795 3,1804 3,1795	0,6039 0,5998 0,6017	6,57
c	2.130	18.060	2.430	450,2	16,0113	1,2730 1,2726 1,2730	3,1798 3,1781 3,1785	0,6031 0,6032 0,6028	6,56

* lubrificação

Tabela A4/6 - Dados da compactação da mistura D

D) Ferrolube M									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.100	18.090	2.670	450,9	15,9985	1,272	3,183	0,600	6,57
						1,272	3,181	0,602	
						1,273	3,182	0,602	
II	2.130	18.060	2.460	450,2	16,0101	1,273	3,180	0,603	6,56
						1,272	3,181	0,605	
						1,272	3,180	0,601	
I	2.130	18.120	2.760	451,7	15,9982	1,274	3,181	0,604	6,54
						1,273	3,181	0,608	
						1,272	3,184	0,601	
III	2.100	18.090	2.610	450,9	16,0232	1,272	3,184	0,606	6,54
						1,272	3,180	0,608	
						1,270	3,179	0,604	
a	2.130	18.090	2.790	450,9	16,0053	1,272	3,179	0,609	6,52
						1,271	3,180	0,608	
						1,270	3,179	0,606	
b	2.100	18.090	2.370	450,9	16,0127	1,2730	3,1781	0,6043	6,58
						1,2724	3,1790	0,5994	
						1,2720	3,1785	0,6020	
c	2.130	18.000	2.190	448,7	16,0006	1,2703	3,1793	0,6054	6,57
						1,2715	3,1782	0,6005	
						1,2713	3,1783	0,6018	
2	2.160	17.970	2.280	447,9	15,9997	1,2712	3,1790	0,5993	6,55
						1,2723	3,1796	0,6091	
						1,2718	3,1785	0,6054	

Tabela A4/7 - Dados da compactação da mistura E

E) Estearato de Zinco paranaense									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.280	18.060	2.430	450,2	15,9966	1,273	3,181	0,601	6,56
						1,272	3,181	0,602	
						1,273	3,181	0,603	
II	2.100	18.120	2.460	451,7	15,9831	1,271	3,179	0,602	6,58
						1,272	3,179	0,605	
						1,271	3,180	0,597	
III	2.130	18.090	2.430	450,9	16,0041	1,271	3,179	0,601	6,58
						1,272	3,179	0,603	
						1,272	3,180	0,601	
a	2.100	18.060	2.580	450,2	16,0013	1,2711	3,1781	0,6026	6,59
						1,2713	3,1780	0,5994	
						1,2719	3,1787	0,6012	
b	2.100	18.000	2.490	448,7	16,0158	1,2716	3,1793	0,6069	6,57
						1,2716	3,1792	0,5989	
						1,2720	3,1787	0,6035	
1	2.130	17.940	2.430	447,2	16,0072	1,2718	3,1799	0,6064	6,53
						1,2725	3,1785	0,6054	
						1,2728	3,1794	0,6063	
c	2.100	17.970	2.580	447,9	15,9805	1,2710	3,1797	0,5991	6,56
						1,2717	3,1794	0,6022	
						1,2710	3,1796	0,6069	

Tabela A4/8 - Dados da compactação da mistura F

F) Estearato de Zinco 135									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.100	18.090	2.670	450,9	16,0007	1,270 1,272 1,271	3,180 3,182 3,178	0,605 0,600 0,607	6,55
II	2.130	18.060	2.460	450,2	15,9898	1,272 1,272 1,270	3,184 3,181 3,180	0,602 0,603 0,599	6,57
I	2.130	18.120	2.760	451,7	15,9982	1,274 1,273 1,272	3,181 3,181 3,184	0,604 0,608 0,601	6,54
III	2.100	18.090	2.610	450,9	16,0232	1,272 1,272 1,270	3,184 3,180 3,179	0,606 0,608 0,604	6,54
a	2.100	18.060	2.790	450,2	15,9859	1,2708 1,2713 1,2724	3,1801 3,1795 3,1790	0,6000 0,6090 0,6054	6,54
b	2.100	18.060	2.520	450,2	15,9766	1,2708 1,2709 1,2717	3,1795 3,1775 3,1777	0,6004 0,6065 0,6039	6,55
c	2.100	18.060	2.850	450,2	16,0070	1,2713 1,2706 1,2709	3,1799 3,1796 3,1797	0,6084 0,6010 0,6056	6,55

Tabela A4/9 - Dados da compactação da mistura G

G) DS 205 sem lubrificante									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
1	2.130	18.240	4.140	454,6	15,9937	1,272	3,180	0,616	6,43
						1,272	3,179	0,615	
						1,271	3,179	0,615	
2	2.100	18.510	3.900	461,4	15,9888	1,272	3,180	0,618	6,41
						1,272	3,179	0,614	
						1,271	3,178	0,620	
3*	2.100	18.930	3.900	471,8	16,0185	1,271	3,180	0,610	6,50
						1,273	3,179	0,611	
						1,271	3,179	0,607	
4	2.100	19.140	3.600	477,1	16,0017	1,272	3,179	0,608	6,54
						1,271	3,179	0,605	
						1,271	3,178	0,602	
5	2.100	19.170	3.540	477,8	15,9813	1,272	3,179	0,611	6,52
						1,273	3,179	0,606	
						1,271	3,178	0,602	
I	2.100	19.110	4.140	476,3	16,0036	1,272	3,178	0,607	6,53
						1,270	3,179	0,611	
						1,271	3,179	0,602	
II	2.100	19.500	4.770	486,0	15,9689	1,272	3,179	0,605	6,51
						1,272	3,178	0,609	
						1,273	3,178	0,607	
III	2.100	19.620	4.800	489,0	16,0073	1,270	3,179	0,608	6,52
						1,270	3,177	0,608	
						1,270	3,177	0,609	
a	2.100	19.170	4.260	477,8	16,0218	1,2709	3,1777	0,6088	6,51
						1,2715	3,1776	0,6088	
						1,2716	3,1780	0,6106	
b	2.100	19.240	4.800	479,6	15,9542	1,2707	3,1783	0,6086	6,50

Tabela A4/11 - Dados da compactação da mistura I

D) Stavisor Zinc E									
Mistura:									
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	Densidade (g/cm³)
I	2.130	18.000	2.010	448,7	15,9980	1,272	3,180	0,602	6,57
						1,271	3,180	0,603	
						1,272	3,180	0,602	
II	2.100	17.970	3.150	447,9	16,0109	1,272	3,179	0,604	6,50
						1,272	3,179	0,613	
						1,273	3,178	0,609	
I	2.100	18.000	3.810	448,7	16,0130	1,271	3,179	0,616	6,51
						1,272	3,180	0,608	
						1,271	3,178	0,602	
III	2.100	18.090	2.880	450,9	15,9903	1,272	3,179	0,608	6,54
						1,272	3,180	0,600	
						1,271	3,179	0,605	
a	2.100	17.880	2.580	445,7	15,9929	1,2721	3,1803	0,5987	6,55
						1,2719	3,1810	0,6080	
						1,2718	3,1800	0,6038	
b	2.100	17.910	2.700	446,4	15,9939	1,2707	3,1785	0,6004	6,55
						1,2709	3,1785	0,6083	
						1,2712	3,1777	0,6041	
c	2.100	17.970	2.790	447,9	16,0030	1,2719	3,1802	0,6081	6,54
						1,2718	3,1785	0,6019	
						1,2715	3,1790	0,6055	

Anexo 5:
Resistência a Verde

Nas tabelas A5/1 a A5/11 são apresentados os dados sobre a medida de resistência a verde (RV). As dimensões dos corpos de prova não estão nestas tabelas pois já foram apresentadas no anexo 4.

Tabela A5/1 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A1

Mistura:	A1) Ceracer							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.100	17.940	2.820	447,2	6,53	1,955	195,5	16,3
II	2.130	17.940	2.700	447,2	6,54	1,940	194,0	16,2
III	2.190	18.060	2.640	450,2	6,52	2,185	218,5	18,2
								Média 16,9
								Desvio 1,1

Tabela A5/2 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A2

Mistura:	A2) Ceracer - Controle I							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.130	17.940	2.640	447,2	6,54	1,950	195,0	16,3
II	2.130	17.940	2.880	447,2	6,55	1,860	186,0	15,6
III	2.100	17.940	2.730	447,2	6,54	1,970	197,0	16,5
								Média 16,1
								Desvio 0,5

Tabela A5/3 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura A3

Mistura:	A3) Ceracer - Controle II							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.220	18.060	2.880	450,2	6,53	2,070	207,0	17,3
II	2.130	18.030	2.910	449,4	6,56	1,965	196,5	16,5
III	2.160	18.030	2.790	449,4	6,50	1,970	197,0	16,3
								Média 16,7
								Desvio 0,5

Tabela A5/4 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura B

Mistura:	B) Allwax							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.160	18.210	3.390	453,9	6,51	2,275	227,5	18,9
II	2.130	18.330	3.510	456,9	6,52	2,285	228,5	19,0
III	2.400	18.450	3.300	459,9	6,53	2,235	223,5	18,7
								Média 18,9
								Desvio 0,2

Tabela A5/5 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura C

Tabela A3.10 - Dados de Ensaio de RV para Pasta Remanente de Mistura								
Mistura:	C) Caplube G							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.130	18.000	2.610	448,7	6,53	1,985	198,5	16,6
II	2.310	18.180	2.130	453,1	6,59	1,965	196,5	16,7
III	2.100	18.090	2.160	450,9	6,59	1,940	194,0	16,5
							Média	16,6
							Desvio	0,1

Tabela A5/6 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura D

Tabela A06 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura								
Mistura:	D) Ferrolube M							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.100	18.090	2.670	450,9	6,57	1,955	195,5	16,6
II	2.130	18.060	2.460	450,2	6,56	2,025	202,5	17,1
III	2.100	18.090	2.610	450,9	6,54	1,975	197,5	16,5
							Média	16,7
							Desvio	0,3

Tabela A5/7 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura E

Tabela A54 - Dados de ensaio de RT - Força de ruptura								
Mistura:	E) Estearato de Zinco paranaense							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.280	18.060	2.430	450,2	6,56	2,045	204,5	17,3
II	2.100	18.120	2.460	451,7	6,58	1,925	192,5	16,3
III	2.130	18.090	2.430	450,9	6,58	1,925	192,5	16,3
							Média	16,6
							Desvio	0,6

Tabela A5/8 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura F

Tabela A9/6 Dados de ensaio de RV por ruptura transversal da mistura:								
Mistura:	F) Estearato de Zinco 135							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.100	18.090	2.670	450,9	6,55	1,975	197,5	16,6
II	2.130	18.060	2.460	450,2	6,57	2,055	205,5	17,4
III	2.100	18.090	2.610	450,9	6,54	1,975	197,5	16,5
							Média	16,8
							Desvio	0,5

Tabela A5/9 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura G

Tabela N.º 2 - Dados do Ensaio de RV para o concreto DS 205								
Mistura:	G) DS 205							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.100	19.110	4.140	476,3	6,53	3,315	331,5	27,6
II	2.100	19.500	4.770	486,0	6,51	3,205	320,5	26,7
III	2.100	19.620	4.800	489,0	6,52	2,885	288,5	23,9
							Média	26,1
							Desvio	1,9

Tabela A5/10 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura H

Tabela A6.16 - Dados de ensaio de RV para pasta mineral Portland								
Mistura:	H) Kenolube							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força Rup. (N)	RV (MPa)
I	2.130	18.030	3.150	449,4	6,55	2,300	230,0	19,4
II	2.130	17.970	2.340	447,9	6,58	2,230	223,0	18,9
III	2.130	17.910	2.400	446,4	6,58	2,275	227,5	19,3
							Média	19,2
							Desvio	0,3

Tabela A5/11 - Dados do ensaio de RV por ruptura transversal da mistura I

Mistura:	I) Stavinor Zinc E							
Amostra	Pré-Carga (kgf)	Carga (kgf)	Carga Ext. (kgf)	Pressão (MPa)	Densidade (g/cm³)	Peso (kg)	Força (N)	RV (MPa)
I	2.130	18.000	2.010	448,7	6,57	1,985	198,5	16,8
II	2.100	17.970	3.150	447,9	6,50	1,900	190,0	15,7
III	2.100	18.090	2.880	450,9	6,54	2,130	213,0	17,9
							Média	16,8
							Desvio	1,1

Anexo 6:

Resistência do Sinterizado e Variação Volumétrica na Sinterização

Nas tabelas A6/1 a A6/11 estão apresentados os dados sobre a medida da resistência do sinterizado (RS). Encontram-se também nestas tabelas os valores de Volume do Compactado a Verde (Vv) e Volume do Sinterizado (Vs), ambos em cm³, e o valor da variação volumétrica de contração na sinterização (dV) das misturas, em porcentagem. As cargas de compactação e as dimensões dos corpos de prova a verde não estão nestas tabelas pois já foram apresentadas no Anexo 4.

Tabela A6/1 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura A1

A1) Ceracer											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espes. (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	451,7	6,58	15,8678	1,2691	3,1726	0,5933	6,59	426	4260	366	2,445
				1,2690	3,1744	0,6032					2,433
				1,2693	3,1732	0,5983					0,51
b	450,2	6,57	15,8860	1,2685	3,1727	0,6042	6,58	408	4080	349	2,439
				1,2690	3,1744	0,5943					2,424
				1,2691	3,1729	0,5994					0,62
c	450,2	6,60	15,8817	1,2690	3,1738	0,5971	6,60	423	4230	364	2,445
				1,2695	3,1736	0,5969					2,428
				1,2691	3,1728	0,5976					0,71
Média										360	0,61
Desvio										9	0,10

Tabela A6/2 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura B

B) Allwax											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espes. (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	458,4	6,60	15,8580	1,2695 1,2694 1,2693	3,1744 3,1747 3,1735	0,5989 0,5933 0,5964	6,60	429	4290	371	2,423 2,402 0,86%
b	454,6	6,60	15,8690	1,2696 1,2694 1,2697	3,1741 3,1736 3,1732	0,5967 0,5975 0,5968	6,60	435	4350	375	2,425 2,405 0,82%
c	451,7	6,59	15,8584	1,2684 1,2692 1,2689	3,1745 3,1736 3,1732	0,5973 0,5978 0,5970	6,59	420	4200	362	2,427 2,406 0,90%
									Média	369	0,86%
									Desvio	7	0,04%

Tabela A6/3 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura C

C) Caplube G											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	V _V / V _S / dV (cm³ / %)
a	449,4	6,55	15,9061	1,2690 1,2692 1,2692	3,1775 3,1746 3,1762	0,5992 0,6071 0,6023	6,55	417	4170	353	2,446 2,430 0,64%
b	452,4	6,57	15,8796	1,2616 1,2687 1,2695	3,1750 3,1764 3,1752	0,5965 0,6019 0,5994	6,59	402	4020	345	2,434 2,410 0,95%
c	450,2	6,56	15,8921	1,2686 1,2687 1,2693	3,1760 3,1750 3,1754	0,5998 0,6005 0,6000	6,57	432	4320	369	2,440 2,418 0,90%
									Média	355	0,83%
									Desvio	12	0,17%

Tabela A6/4 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura D

Tabela A6/4 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura D

D) Ferrolube M											
Mistura:											
Amostra	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	450,9	6,58	15,8847	1,2682 1,2683 1,2692	3,1730 3,1733 3,1730	0,6007 0,5966 0,5984	6,59	462	4620	396	2,434 2,409 1,03%
b	448,7	6,57	15,8721	1,2682 1,2690 1,2689	3,1731 3,1734 3,1722	0,5963 0,6012 0,5984	6,59	450	4500	386	2,434 2,410 1,01%
c	447,9	6,55	15,8717	1,2688 1,2689 1,2695	3,1740 3,1734 3,1728	0,6056 0,5959 0,6027	6,55	450	4500	382	2,444 2,422 0,92%
									Média	388	0,99%
									Desvio	7	0,06%

Tabela A6/5 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura E

E) Estearato de Zinco paranaense											
Mistura:											
Amostra	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	450,2	6,59	15,8712	1,2693 1,2699 1,2700	3,1758 3,1779 3,1770	0,6003 0,5967 0,5991	6,57	429	4290	368	2,429 2,415 0,57%
b	448,7	6,57	15,8856	1,2699 1,2698 1,2698	3,1771 3,1772 3,1769	0,6040 0,5962 0,5992	6,56	396	3960	338	2,438 2,420 0,76%
c	447,9	6,56	15,8697	1,2704 1,2695 1,2699	3,1755 3,1767 3,1761	0,6043 0,6020 0,6034	6,52	429	4290	362	2,436 2,433 0,13%
									Média	356	0,49%
									Desvio	16	0,32%

Tabela A6/6 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura F

F) Estearato de Zinco 135											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	450,2	6,54	15,8596	1,2693 1,2697 1,2697	3,1746 3,1786 3,1766	0,6080 0,5982 0,6034	6,52	414	4140	350	2,445 2,433 0,51%
b	450,2	6,55	15,8495	1,2698 1,2695 1,2697	3,1754 3,1776 3,1750	0,6042 0,5972 0,6016	6,54	432	4320	367	2,439 2,424 0,62%
c	450,2	6,55	15,8597	1,2699 1,2695 1,2700	3,1754 3,1782 3,1776	0,5983 0,6013 0,6057	6,53	396	3960	336	2,445 2,428 0,71%
									Média	351	0,61%
									Desvio	16	0,10%

Tabela A6/7 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura G

G) DS 205											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	477,8	6,51	16,0023	1,2690 1,2697 1,2698	3,1763 3,1750 3,1746	0,6112 0,6067 0,6088	6,52	426	4260	353	2,462 2,455 0,30%
b	479,6	6,50	15,9346	1,2697 1,2695 1,2715	3,1758 3,1741 3,1752	0,6074 0,6049 0,6064	6,52	477	4770	398	2,454 2,445 0,39%
c	487,0	6,52	15,9812	1,2694 1,2697 1,2698	3,1766 3,1753 3,1748	0,6063 0,6056 0,6058	6,54	441	4410	369	2,454 2,443 0,46%
									Média	373	0,38%
									Desvio	23	0,08%

Tabela A6/8 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura H

H) Kenolube											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	449,4	6,58	15,8483	1,2685 1,2689 1,2691	3,1741 3,1755 3,1741	0,5985 0,5982 0,5984	6,58	447	4470	384	2,427 2,410 0,71%
b	449,4	6,58	15,8842	1,2685 1,2691 1,2691	3,1725 3,1746 3,1731	0,6018 0,5974 0,5993	6,58	453	4530	387	2,430 2,414 0,67%
c	447,2	6,59	15,8619	1,2685 1,2694 1,2694	3,1731 3,1735 3,1742	0,5961 0,5993 0,5979	6,59	447	4470	384	2,427 2,408 0,78%
									Média	385	0,72%
									Desvio	2	0,06%

Tabela A6/9 - Resistência do sinterizado e variação volumétrica na sinterização da mistura I

I) Stavinor Zinc E											
Mistura:	Pressão (MPa)	DV (g/cm³)	Peso (g)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)	DS (g/cm³)	Carga (kgf)	Força Rup. (N)	RS (MPa)	Vv / Vs / dV (cm³ / %)
a	445,7	6,55	15,8657	1,2698	3,1790	0,5962	6,53	411	4110	348	2,441
				1,2692	3,1778	0,6054					2,430
				1,2698	3,1771	0,6054					0,45%
b	446,4	6,55	15,8625	1,2709	3,1775	0,6067	6,52	420	4200	355	2,441
				1,2702	3,1782	0,5978					2,432
				1,2699	3,1767	0,6027					0,38%
c	447,9	6,54	15,8732	1,2697	3,1780	0,6053	6,53	396	3960	335	2,447
				1,2696	3,1784	0,5994					2,431
				1,2696	3,1770	0,6026					0,66%
									Média	346	0,50%
									Desvio	10	0,15%

Anexo 7:

Dureza do Sinterizado

Tabela A7/1 - Dureza HB 250 - esfera 5,0 mm das amostras

Amostra	Dureza (HB 250 - esfera 5,0 mm)					Média	Desvio
A1	55,8	55,8	54,2			55,3	0,9
A2	61,2	56,3	56,3			57,9	2,8
A3	55,8	55,8	53,8			55,1	1,2
B1	55,8	55,2	53,8			54,9	1,0
B2	52,8	51,9	53,8			52,8	1,0
B3	55,2	51,9	48,8			52,0	3,2
C1	54,6	53,8	52,8			53,7	0,9
C2	57,4	52,8	54,6			54,9	2,3
C3	53,8	52,8	55,2			53,9	1,2
D1	55,8	57,9	53,8			55,8	2,1
D2	56,8	55,8	53,8			55,5	1,5
D3	49,7	62,4	52,4	56,8	55,8	55,4	4,8
E1	55,8	60,1	52,4	52,4	54,2	55,0	3,2
E2	53,8	50,1	49,7	51,9	50,6	51,2	1,7
E3	58,9	54,6	48,0	54,2	57,9	54,7	4,3
F1	51,0	51,0	50,1			50,7	0,5
F2	50,1	52,8	52,8			51,9	1,6
F3	53,8	49,2	51,9			51,6	2,3
G1	48,0	48,4	43,9			46,8	2,5
G2	47,1	47,1	48,4			47,5	0,8
G3	49,2	48,8	51,45			49,8	1,4
H1	49,2	56,8	50,1	53,8		52,5	3,5
H2	54,2	57,9	59,5			57,2	2,7
H3	53,8	53,3	52,8			53,3	0,5
I1	50,6	51,0	49,2			50,3	0,9
I2	50,6	53,3	50,1			51,3	1,7
I3	51,0	52,8	49,2			51,0	1,8

Anexo 8:

Micrografias

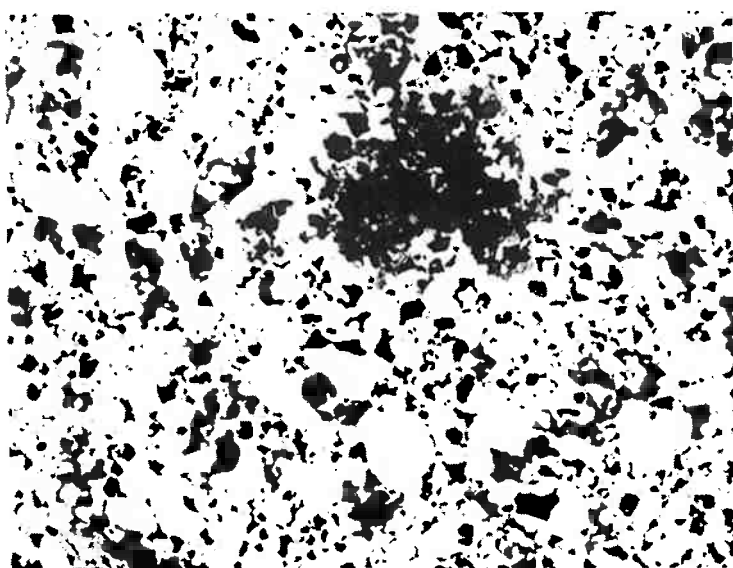


Figura A8/1 - Aglomerado de porosidade na barra sinterizada da mistura A1, prejudicial à sua resistência; aumento 100 x; sem ataque

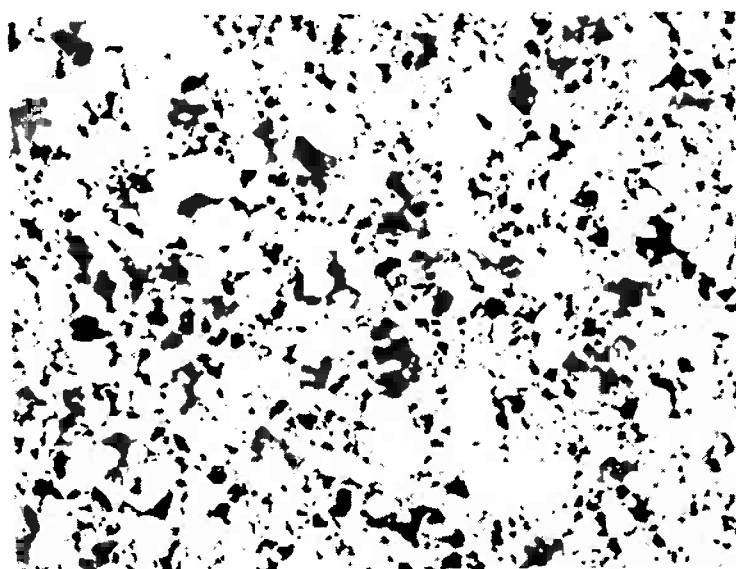


Figura A8/2 - Porosidade na barra da mistura B; aumento 100 x; sem ataque

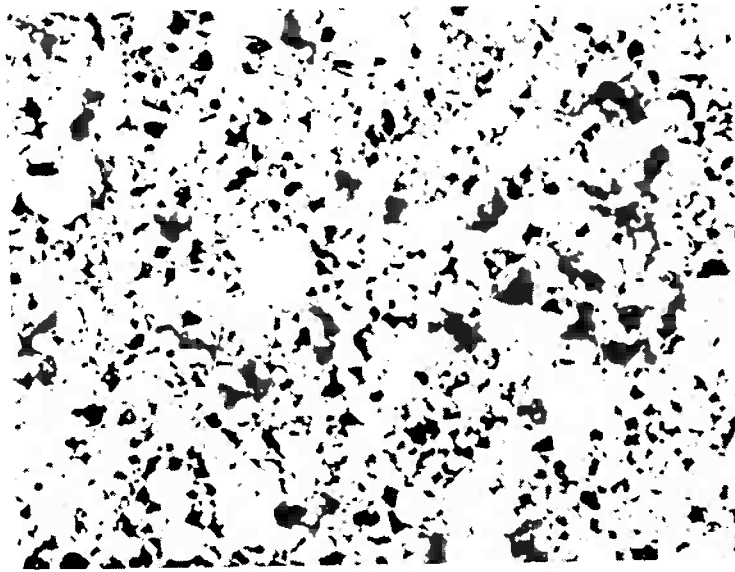


Figura A8/3 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura C; aumento 100 x; sem ataque

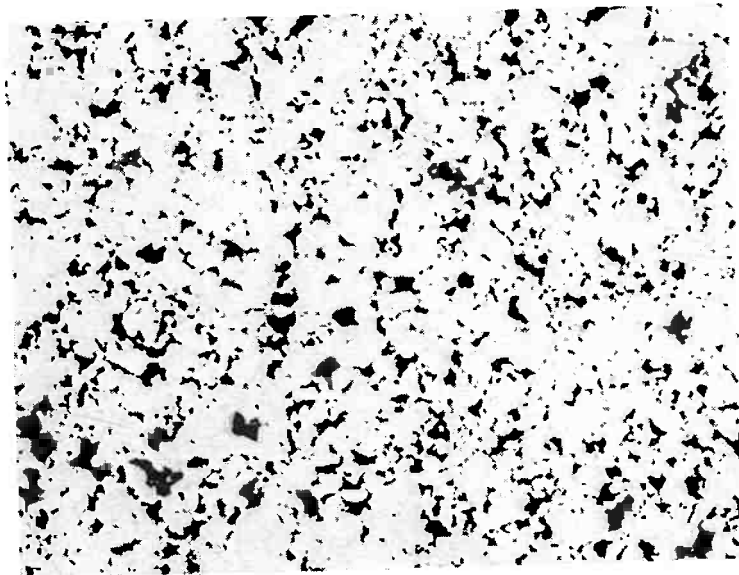


Figura A8/4 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura D; aumento 100 x; sem ataque

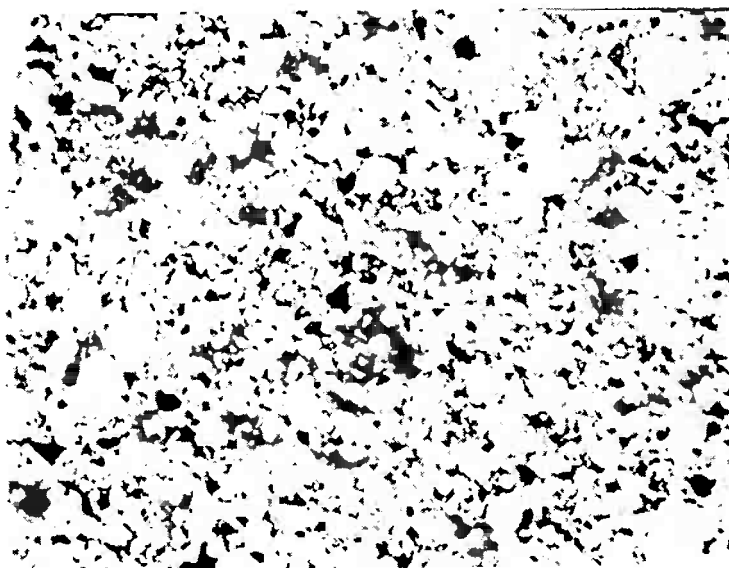


Figura A8/5 - Porosidade fina e bem distribuída na barra da mistura E; aumento 100 x; sem ataque

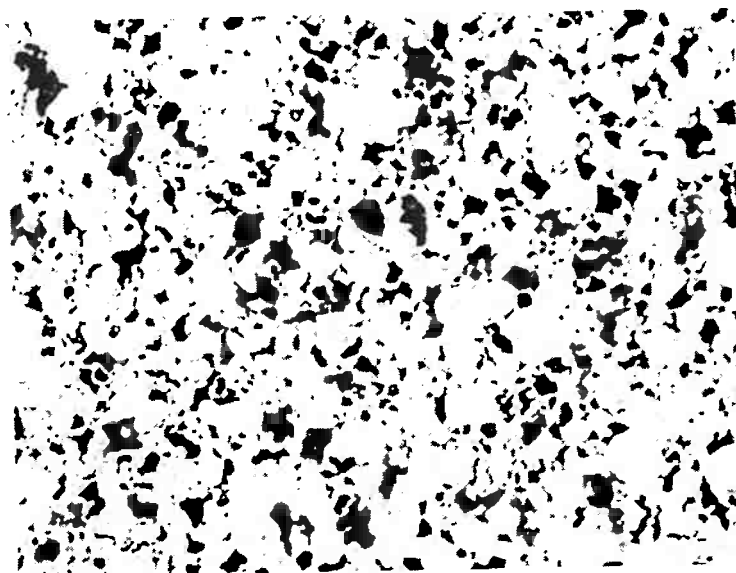


Figura A8/6 - Porosidade na barra da mistura F; aumento 100 x; sem ataque

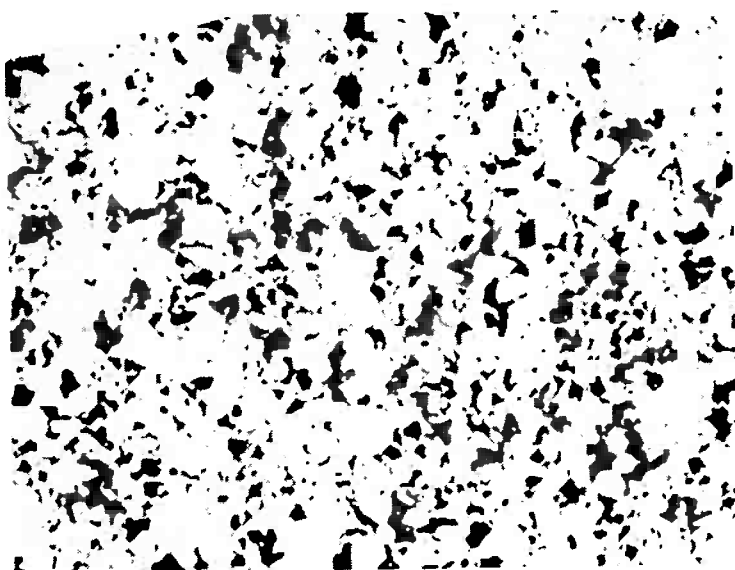


Figura A8/7 - Porosidade na barra da mistura G; aumento 100 x; sem ataque

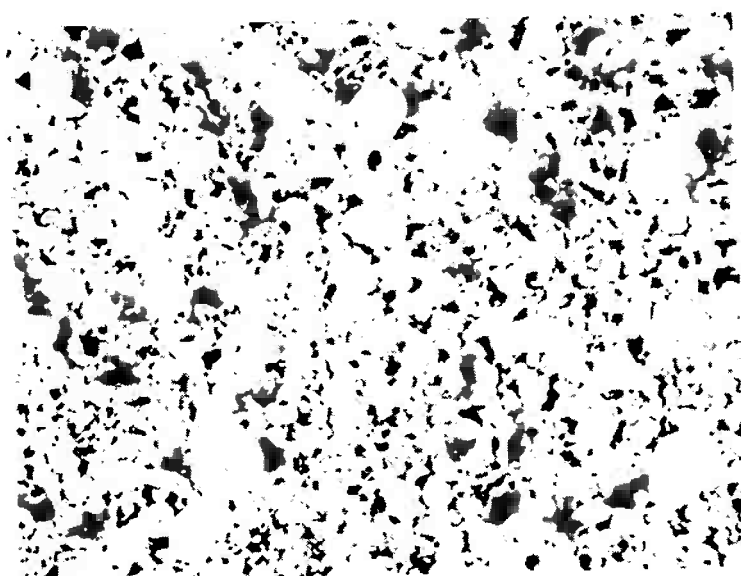


Figura A8/8 - Porosidade na barra da mistura H; aumento 100 x; sem ataque

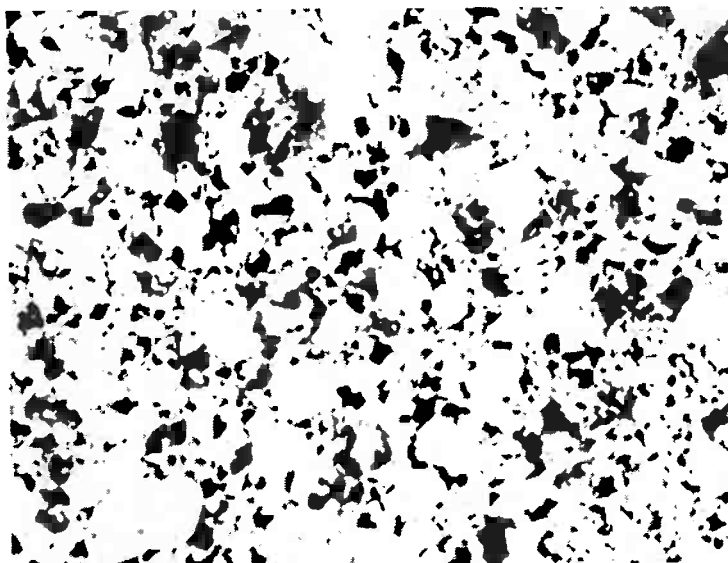


Figura A8/9 - Porosidade na barra da mistura I; aumento 100 x; sem ataque