AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS SINTERIZADOS PARA
USO EM INSERTOS DE ASSENTOS DE VÁLVULAS**

IGOR PASSOS DOS SANTOS

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi**

São Paulo

2014

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS SINTERIZADOS PARA
USO EM INSERTOS DE ASSENTOS DE VÁLVULAS**

IGOR PASSOS DOS SANTOS

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

São Paulo

2014

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Roseli Passos dos Santos e Humberto Barbosa dos Santos, pelo apoio e exemplo na dedicação aos estudos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, sem o qual nada poderia;

Ao meu orientador Jesualdo Luiz Rossi, pelos inúmeros ensinamentos e horas dedicadas a este trabalho;

Aos meus pais, Roseli Passos e Humberto Barbosa, pela dádiva da vida, por tudo me proverem e pelo incentivo ilimitado que dão aos estudos, para meus irmãos e para mim;

Aos meus irmãos Guilherme Passos dos Santos e Renan Passos dos Santos, por compreenderem prolongadas ausências deste que muito os ama;

Aos meus queridos avós, Herminio Barbosa dos Santos, Darcy Gimenes dos Santos – por ter acompanhado a defesa deste mestrado, Dolores Augusta Rentroe Passos e José dos Santos Passos, que muito me auxiliou fazendo companhia em visitas à diversas empresas e lojas de equipamentos;

À minha noiva, Gabriela Gato da Silva, pela paciência e amor que precisa ter a família de um pesquisador;

Aos funcionários da Höganäs Brasil Ltda., em especial Henrique Duarte Lopes, Sandra Dantas, Leandro Albuquerque e Márcio Carvalho, pela grande prestatividade e fornecimento de pós metálicos.

Aos funcionários da Combustol & Metalpó Ltda., em especial Marcelo Mantovani Iasi e José Ricardo Rodrigues, por diversos esclarecimentos técnicos, fornecimento de amostras e sinterização dos insertos.

Aos amigos Jorge Soares, Alessandro Zanin e Alfredo Lima da GKN Sinterizados, pelo valioso auxílio na manutenção da prensa Gasbarre.

Aos amigos técnicos do CPP Marcelo de Oliveira e Thiago dos Santos Ferreira, pelo auxílio constante na manutenção dos equipamentos utilizados na execução deste trabalho.

Aos amigos técnicos do laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises, Flávia Rodrigues de Oliveira Silva e Glauson Aparecido Ferreira Machado pelo auxílio no microscópio eletrônico de varredura.

Ao Sr. Carlos Alberto Beraldo, que solicitamente passou pelo IPEN pela instrução na operação da prensa hidráulica instrumentada.

Ao amigo técnico e estagiário do CCTM Eduardo José Nogueira, por emprestar seus conhecimentos em ferramentaria e por sua enorme prestatividade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - que apoiou a realização do presente trabalho pela concessão de bolsa de Mestrado.

“A ciência se compõe de erros que, por sua vez, são os passos até a verdade.”

Júlio Verne

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS SINTERIZADOS PARA USO EM INSERTOS DE ASSENTOS DE VÁLVULAS

Igor Passos dos Santos

Resumo

O objetivo deste trabalho foi propor potenciais misturas de pós para utilização na indústria automotiva, mais especificamente ligas metálicas aplicadas na produção de insertos de assentos de válvulas. A pesquisa foi dividida em etapas como segue a produção via metalurgia do pó: seleção dos componentes para as ligas metálicas estudadas, aquisição e preparo de cada um dos pós metálicos, caracterização física e microscópica dos componentes da mistura, definição das proporções a serem usadas, mistura dos pós constituintes, compactação a frio em prensa uniaxial, sinterização das peças de acordo com ciclo térmico e atmosfera específicos, realização de ensaios de dureza, resistência à compressão radial e análise microestrutural por microscopia de varredura eletrônica. As misturas de pós forma basicamente pó de ferro misturado com aços rápidos, AISI M3/2, D2 e M2. Os insertos produzidos com a liga metálica denominada M3/2 mostraram-se mais vantajosos em relação aos demais por terem apresentado melhor desempenho nos testes de dureza e resistência à compressão radial.

PROCESSING AND CHARACTERIZATION OF SINTERED STEEL FOR USE IN VALVE SEAT INSERTS

Igor Passos dos Santos

Abstract

The aim of this study was to propose potential materials for use in the automotive industry, specifically alloys applied in the production of valve seat inserts. The research was divided in steps according to standard powder metallurgy technique: selecting components for the studied alloys, acquisition and preparation of each of the metal powders, physical and microscopic characterization of the components, defining the proportions to be used, a mixture of alloys, compaction in uniaxial presses, sintering the parts according to thermal cycle and specific atmosphere, hardness tests, resistance to radial compression and microstructural analysis using scanning electron microscopy. The powders mixtures were basically iron powder mixed with high-speed steels type AISI M3/2, D2 and M2. The valve seat inserts made with the alloy M3/2 showed to be more advantageous in relation to the other mixtures in terms of hardness and transverse rupture strength.

SUMÁRIO

Assunto	Pág.
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Prefácio	1
1.2 Relevância do assunto	2
1.3 Objetivos, abrangência e delimitação da abordagem	8
2 – REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 Funcionamento de motores ciclo Otto	9
2.2 Inserto para assento de válvulas	16
2.3 Metalurgia do pó	17
2.3.1 Materiais de partida	19
2.3.2 Compactação	22
2.3.3 Sinterização	24
2.3.4 Tratamentos termoquímicos	25
2.4 Usinagem	25
2.4.1 Usinagem e usinabilidade	26
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Composição das ligas usadas no trabalho	27
3.2 Morfologia dos pós	30
3.3 Mistura dos componentes das ligas	41

3.4 Compactação	42
3.5 Sinterização	50
3.6 Caracterização física dos insertos	51
3.6.1 Densidade	51
3.6.2 Dureza aparente	52
3.6.3 Ensaio de resistência à ruptura radial	53
3.7 Caracterização microestrutural dos insertos	53
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5 – CONCLUSÃO	64
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	66

1 - INTRODUÇÃO

1.1 Prefácio

Ao longo dos últimos tempos, os processos de produção industrial tornaram possível a criação de produtos cada vez mais otimizados, minimizando o desperdício de matéria prima e custos para a produção. Fatores como energia aplicada durante o processo e cuidados com o meio ambiente fazem parte dos pontos que definem a produção industrial, somados às antigas e perenes circunstâncias como viabilidade financeira, perspectiva de lucro e disponibilidade de insumos.

Em busca de atender imposições como essas, grandes empresas, centros universitários e pesquisadores têm investido tempo e dinheiro em variados setores do conhecimento humano. Dentre eles existe um setor denominado ciência dos materiais. Os estudos realizados com materiais vêm inovando há muito tempo a produção em diversos setores. Reduzir custos, tornar produtos mais leves, portáteis e resistentes são fatores cruciais em diversas vertentes de produção de larga escala. Características importantes de um produto final dependem fundamentalmente dos estudos realizados com os materiais que o compõe, tal como a resistência mecânica de peças vinculadas à segurança de automóveis, dureza e vida útil de materiais usados na construção civil, absorção de impactos sem danificar componentes internos de equipamentos eletrônicos portáteis como celulares e etc.

Dentro da ciência dos materiais, destaca-se um ramo chamado metalurgia do pó (MP). Algumas vantagens dessa técnica são possibilidade de misturas de metais não viáveis por outros meios, redução de peso gerada pela utilização de ligas leves e, em alguns casos, propriedades mecânicas superiores às encontradas em materiais convencionais. Materiais obtidos por esse processo têm chamado a atenção de empresas e pesquisadores graças a seu potencial, que muitas vezes vai ao encontro das necessidades de produção em determinados produtos industrializados.

A viabilidade de produzir qualquer produto depende diretamente dos custos envolvidos. Para a indústria metalúrgica, custos de usinagem e usinabilidade das peças são fatores determinantes durante a fabricação. A resistência ao desgaste afeta a aplicação da peça depois de pronta, definindo sua vida útil, desempenho e

ciclo de manutenção periódica.

Devido às vantagens dessa técnica, indústrias do mundo têm procurado aplicar técnicas de MP na fabricação de diversos componentes. A produção de aeronaves utiliza peças concebidas com compósitos de matriz metálica há mais tempo. Já a indústria automotiva ainda tem muito para aumentar essa utilização, apesar de alguns países demonstrarem uma porcentagem razoável de peças sinterizadas em seus automóveis.

1.2 Relevância do assunto

A indústria automotiva brasileira tem muito a expandir na aplicação de peças fabricadas via MP. De acordo com a *European Powder Metallurgy Association* [EPMA, 2011] foram consumidas 400.000 toneladas de peças sinterizadas ao redor do mundo no ano de 2010. O Brasil foi responsável pelo consumo de 5% da quantidade mundial de peças produzidas por MP nesse período, o que corresponde a 20.000 toneladas. Como demonstram esses números, existe ainda um grande potencial de crescimento para o consumo de peças sinterizadas no mercado nacional.

A EPMA declarou em seu relatório anual que a arrecadação financeira feita em prol da instituição por seus membros foi de € 796.451,00 no ano de 2009 para € 1.484.707,00 em 2010. Estes dados indicam um aumento de 86% na arrecadação obtida pela instituição de um ano para o outro, indicando uma tendência de interesse crescente no setor de MP.

“A adesão à metalurgia do pó no Brasil e no mundo vem crescendo de forma consistente, sustentada por inúmeras vantagens. A lista de benefícios nos processos industriais de sinterização é grande e, não raro, surpreende os coordenadores de produção que ainda não experimentaram a tecnologia e assistem às exposições de especialistas na área. A primeira das vantagens é a redução de custos. A tecnologia gera até 30% de economia, por exemplo, na produção de componentes metálicos automobilísticos de larga escala. A sinterização consome muito menos energia (cerca de 29 MJ/kg de peça processada, contra 65-82 MJ/kg da usinagem) e ainda permite uma maior

produtividade na produção de determinadas peças. Outro grande diferencial é o aproveitamento da matéria-prima. Enquanto a usinagem gera resíduos de até 50%, a sinterização aproveita acima de 95% do pó metálico que aplica na fabricação da peça” [Höganäs, 2008].

Pode-se calcular em porcentagem algumas das características interessantes do processo de produção por MP. Trata-se de uma diferença de 45% nos resíduos gerados pelo processo usual de usinagem e pelo processo de compressão de pós-metálicos, que é uma diferença bastante significativa considerando que os resíduos geram um custo extra agregado ao produto final. Outro ponto importante trazido pela publicação da Höganäs trata do dispêndio de energia durante o processo de fabricação. A sinterização utiliza entre 35,63% e 44,61% da energia consumida para a criação das mesmas peças pelos processos tradicionais de usinagem.

No ano de 2006 o Brasil produziu menos que 18.080 toneladas de peças utilizando o processo de metalurgia do pó. Isso corresponde a menos de 2% da produção mundial no setor, como pode ser observado no gráfico da FIG 1.1. Nota-se que o mercado da indústria de peças sinterizadas apresenta um grande potencial de expansão para os países da América do Sul, entre eles o Brasil, podendo assim aumentar sua porcentagem na participação mundial dentro deste nicho de produção.

Figura 1.1 - Venda de pó de ferro em 2006 [Höganäs AB 2007 in PALLINI, M.].

De acordo com dados obtidos no ano de 2008, o Brasil teve uma aplicação de 1% da utilização de sinterizados no setor de produção de motocicletas, enquanto a China - um dos países que também compõem o BRIC - teve uma aplicação de 10% de todo material sinterizado aplicado no mesmo setor industrial.

A utilização da tecnologia dos pós-metálicos também se mostrou acentuada no mercado chinês de ferramentas elétricas, com 24% de toda a produção nacional de sinterizados contra apenas 2% do Brasil. Esses dados são expostos graficamente na FIG 1.2.

Figura 1.2 – Utilização de peças sinterizadas no Brasil e na China durante o ano de 2008 [Höganäs AB 2007 in PALLINI, M.].

A comparação entre Brasil e China realizada nos gráficos das FIG. 1.1 e 1.2 demonstra que ainda há espaço na economia brasileira para o desenvolvimento e aplicação de materiais sinterizados.

Em 2008 a produção de peças por metalurgia do pó no Brasil ficou concentrada nos setores de utilidades domésticas, com 26%, e a esmagadora parcela de 70% da produção voltada para o setor automotivo. Existe, portanto, um grande potencial de crescimento a aplicação dessa técnica nos demais setores da indústria brasileira.

Como os gráficos não fornecem valores absolutos, é precipitado dizer que o setor automotivo e o setor de utilidades domésticas no Brasil estejam bem supridos ou utilizando em demasia essa técnica. O crescimento de 8,34% [ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, 2012] no mercado automotivo brasileiro entre 2012 e 2013 mostra justamente que ainda pode-se ampliar a utilização de metalurgia do pó no setor.

Uma das maneiras de mensurar o uso de peças sinterizadas na indústria automotiva é fazer uma relação mostrando qual a massa média de componentes sinterizados que são necessários para a produção de um veículo. Um estudo realizado em parceria pela MPIF (*Metal Powder Industries Federation*), Metaldyne, EPMA (*European Powder Metallurgy Association*) e pela empresa Höganäs mostra que houve um aumento de 59% na utilização de materiais sinterizados entre os anos de 1995 e 2009, no mundo todo [Höganäs AB 2007 *in* PALLINI, M.]. Como indicado na TAB. 1.1, o estudo mostrou ainda que a América do Norte foi a região no mundo que mais aumentou a aplicação dessa tecnologia, passando de 15 kg/veículo em 1995 para 22 kg/veículo em 2009, um aumento de 68% (9% maior do que o observado no restante dos continentes). Ásia e Europa tiveram um aumento de 100% no período, que foi maior que o da América do Sul. Ainda, há de se observar que os valores absolutos de material sinterizado por veículo produzido são maiores na Ásia e Europa (10 e 12 kg/veículo respectivamente, no ano de 2009) contra singelos 6 kg/veículo na América do Sul. Estes dados reforçam a ideia de que ainda há espaço no mercado sul-americano e, portanto, no mercado brasileiro para a aplicação da metalurgia do pó.

Tabela 1.1 - Aplicação de sinterizados [Höganäs AB 2007 *in* PALLINI, M.].

Média de aplicação de materiais sinterizados - kg por veículo					
	América do Norte	Europa	Ásia	América do Sul	Mundo (Σ)
1995	15	6	5	3,5	29,9
2009	22	12	10	6	50
Aumento	47%	100%	100%	71%	67%

A FIG. 1.3 foi utilizada de base para a montagem da TAB 1.1. Ela demonstra os valores discutidos no último parágrafo e organizados na TAB 1.1 distribuídos ao longo de um planisfério, com os valores pertinentes sobre cada um dos continentes.

Figura 1.3 – Utilização de peças sinterizadas em automóveis em 1995 e em 2009 [Höganäs AB 2007 in PALLINI, M.].

O desenvolvimento deste trabalho trazendo-o como um tema de mestrado é fruto de um trabalho anterior, do ano de 2006, através de uma parceria entre o IPEN e uma montadora automotiva, objetivando o aprimoramento das ligas metálicas que até então eram utilizadas na fabricação de insertos para assentos de válvulas.

Tal iniciativa culminou na elaboração de uma tese de doutorado [Jesus Filho, E. S., 2006], para a qual o pesquisador Edson Souza de Jesus Filho apresentou como objetivos:

- Propor uma liga para fabricar os insertos que fosse isenta dos elementos cobalto e chumbo, devido ao elevado custo e efeitos toxicológicos, respectivamente;
- Realizar estudos sobre a usinabilidade das ligas obtidas, uma vez que a peça em questão requer este acabamento antes de entrar em uso;
- Estudar o comportamento ao desgaste das ligas, pois o componente em questão é submetido a contatos constantes com a válvula.

Houve inúmeras mudanças nas tecnologias que envolvem a MP nos anos seguintes. Alterações nos valores de insumos metálicos, tecnologias inovadoras na fabricação de peças sinterizadas e novas necessidades da indústria

automotiva frequentemente implicam em revisões dos parâmetros que tornam um produto otimizado.

Algumas possibilidades para trabalhos futuros foram deixadas pelo próprio autor da tese [Jesus Filho, E. S., 2006], apontando novos estudos que poderiam ser desenvolvidos com base em sua pesquisa.

O presente trabalho nasce como uma ramificação dessas sugestões, no objetivando esmiuçar as sugestões deixadas para trabalhos futuros acerca de insertos para assentos de válvulas fabricados via metalurgia do pó.

1.3 Objetivos, abrangência e delimitação da abordagem

A divisão do trabalho em duas etapas foi adotada para simplificar sua realização e descrição. A primeira consistiu em obter os materiais de estudo, sinterizando insertos com diferentes misturas de pós metálicos, com padrões de produção e dimensionais bem definidos. A segunda etapa teve como objetivo avaliar características mecânicas e microestruturais das misturas propostas.

A abrangência do trabalho volta-se para aplicação em motores de combustão interna ciclo Otto, com funcionamento de quatro tempos, mais especificamente nos insertos de assentos de válvulas - peças fundamentais para o bom funcionamento de um motor devido à garantia de estanqueidade na câmara de combustão, provida pelo contato inserto - válvula. A durabilidade de um conjunto *powertrain* também depende dos materiais dos quais são produzidos os insertos.

O trabalho tem como delimitação o estudo de duas novas misturas de pós metálicos para se obter os insertos, bem como a repetição de uma mistura já testada na pesquisa precursora deste mestrado. Serão estudadas, portanto, duas misturas novas e comparadas com a mistura já proposta.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Funcionamento de motores ciclo Otto

O primeiro motor de combustão interna operando dentro de um ciclo de quatro tempos foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Nikolaus August Otto, em 1876 [Scalon, V. L. 2014]. Muitas fontes definem motores de combustão interna como máquinas térmicas que transformam a energia proveniente de uma reação química em energia de movimento. Entretanto para que esta afirmação se adéque à descrição de um motor, é necessário acrescentar duas importantes observações: a transformação de energia química em energia cinética deve ser cíclica e o processo pelo qual a máquina converte uma energia em outra deve controlar a queima do combustível, garantindo que todo o funcionamento ocorra de maneira previsível.

O ciclo de funcionamento dos motores Otto é dividido em quatro etapas - e por isso recebe o nome característico de motor quatro tempos. São elas: admissão, compressão, combustão e escape. Ao término do último tempo de funcionamento (escape), o mecanismo retorna para a execução da primeira etapa (admissão), permitindo um funcionamento ininterrupto do motor. Isto será melhor detalhado mais a frente.

Para manter a queima do combustível sob controle durante todo o processo, o motor ciclo Otto conta com peças internas que proporcionam, além do controle, uma divisão bem definida entre as etapas de seu funcionamento.

Figura 2.1. Foto de um motor ciclo Otto com bloco em corte. As peças móveis pistão (a) e válvula (b) foram preservados inteiros [Site DEMOTOR, 2014].

O pistão é o componente responsável por converter a energia liberada pela combustão (energia química) em movimento linear (energia cinética). Toda vez que a mistura ar/combustível é queimada pela centelha da vela de ignição, o pistão se movimenta devido à expansão dos gases oriundos da combustão. Na FIG. 2.1 pode-se observar que o pistão tem liberdade de movimento unidirecional na camisa do motor, descendo durante os tempos denominados admissão e combustão, subindo nas etapas que levam nome de compressão e escape.

A biela é a peça que faz a ligação entre o pistão e a árvore de manivelas do motor. Uma representação dessa peça é feita na FIG. 2.2, onde a biela aparece ligada a um pistão, semitransparente na imagem. Nota-se como as peças são unidas pelo pino central do pistão, tornando os dois um só objeto articulado. A biela acompanha os movimentos ascendentes e descendentes do pistão, dentro do bloco do motor.

Figura 2.2. Biela unida ao pistão [Site HOWSTUFF, 2014].

Árvore de manivelas, girabrequim ou virabrequim são os nomes dados à peça onde se fixa à extremidade da biela que não está presa ao pistão. A função do virabrequim é converter o movimento retilíneo de ida e vinda dos pistões em movimento circular na árvore de manivelas. Para veículos automotores esse movimento circular é aproveitado no giro do conjunto formado pelas rodas e pneus, passando antes por uma caixa de redução (conjunto de engrenagens que compõem o sistema de transmissão dos automóveis). Na FIG. 2.3 há um conjunto de quatro pistões ligados ao virabrequim por suas respectivas bielas. Nota-se que o girabrequim é uma manivela composta, com o número de excentricidades variando em função da quantidade de pistões do motor.

Figura 2.3. Conjunto de quatro pistões ligados ao virabrequim por suas respectivas bielas [Site HOWSTUFF, 2014].

As válvulas são os componentes do motor que fazem a abertura e o fechamento da parte superior da câmara de combustão, tanto para entrada da mistura ar/combustível como para a saída dos gases resultantes da queima de combustível (FIG. 2.4.). Os tempos do motor - admissão, compressão, combustão e escape - também são definidos pela abertura e fechamento das válvulas, sendo fundamental observar sua posição para saber em que etapa do ciclo se encontra um motor.

A FIG. 2.5 mostra a atuação de um importante componente dos motores ciclo Otto: o eixo de comando de válvulas. Para que haja um sincronismo na movimentação das peças do motor, é necessário que elas estejam interligadas de alguma forma. No exemplo mostrado na FIG. 2.5, a ligação entre o virabrequim (mais abaixo) e os eixos de comando de válvulas (no topo da figura, duas barras cilíndricas com saliências excêntricas) é feita por uma corrente. O eixo comando de válvulas tem a função de abrir e fechar as válvulas de escapamento e admissão no tempo correto, promovendo os quatro ciclos do motor conforme o cilindro sobe e desce. As saliências vistas no eixo do comando forçam cada uma das válvulas para baixo, fazendo com que elas se abram conforme o eixo do comando de válvulas gira.

Figura 2.4. Desenho esquemático da câmara de combustão em um motor [Site HOWSTUFF, 2014].

Figura 2.5. Detalhe de um importante componente em um motor ciclo Otto: eixos de comando de válvulas, situados na parte superior da ilustração [Site HOWSTUFF, 2014].

Em motores monocilíndricos, os quatro tempos ocorrem em sequência. Para conjuntos mecânicos que funcionam com mais de um cilindro, os tempos também ocorrem em sequência, mas os cilindros alternam a execução de cada

etapa. Dessa forma, enquanto um dos cilindros de um motor com 4 cilindros estiver na fase de admissão, outro cilindro desse mesmo motor estará comprimindo a mistura ar/combustível e os dois restantes estarão na fase de combustão e escape. As FIG. 2.6 e 2.7 retratam o ciclo que ocorre em um cilindro e suas válvulas durante as quatro etapas de funcionamento do motor.

Figura 2.6. Etapas de funcionamento do motor ciclo Otto, com a posição das válvulas descrita na parte superior da imagem [Site UFRGS, 2014].

O primeiro tempo do motor é chamado de admissão - FIG. 2.6. Esta etapa é caracterizada pelo movimento de descida de pistão, aspirando a mistura ar/combustível para o interior da câmara de combustão. A válvula de admissão encontra-se aberta, dando passagem para o fluxo de ar/combustível, enquanto a válvula de escapamento permanece fechada. A etapa seguinte recebe o nome de compressão - FIG. 2.6. Nela o pistão realiza um movimento ascendente, comprimindo a mistura ar/combustível que havia entrado na etapa anterior. Para que a compressão seja efetiva, tanto a válvula de admissão como a válvula de escape permanecem fechadas durante esta etapa.

Figura 2.7. Etapas de funcionamento do motor ciclo Otto, com a posição das válvulas descrita na parte superior da imagem [Site UFRGS, 2014].

No final da compressão, quando o pistão está próximo do ponto mais alto de seu percurso (ponto morto superior), uma centelha elétrica gerada pela vela de ignição faz com que a mistura ar/combustível queime. A expansão dos gases força o pistão a descer, realizando trabalho sobre o virabrequim. Dessa forma a energia do combustível é transferida para o virabrequim. Tanto a válvula de escape quanto a de admissão ficam fechadas durante essa etapa, chamada de combustão (FIG. 2.7). Assim a câmara permanece isolada, fazendo com que os gases em expansão empurrem o pistão para baixo.

O quarto e último tempo do ciclo recebe o nome de escape - FIG. 2.7. Durante essa etapa o pistão sobe, forçando os gases a saírem pela válvula de escapamento que se encontra aberta. A válvula de admissão permanece fechada, restringindo a passagem de gases e direcionando o fluxo unicamente para os dutos de escapamento. Ao término dessa etapa o ciclo começa novamente, com o pistão descendo e a mistura ar/combustível entrando na câmara - tempo de admissão, FIG. 2.6. O conjunto válvula e assento de válvula de escapamento é o mais solicitado em termos de exposição a altas temperaturas e erosão pelos gases quentes de escape.

2.2 Inserto para assento de válvulas

A região das válvulas que entra em contato com o cabeçote do motor, vedando a câmara de combustão, recebe o nome de “assento da válvula” - FIG. 2.8 b. Na fabricação dos cabeçotes adota-se o uso de um anel metálico que é inserido na região de atuação da válvula. Esse anel é composto de materiais diferentes do cabeçote, e tem propriedades específicas que garantem boa usinabilidade associada com melhor resistência ao desgaste e possibilitando vedação encaixe mais duradoura com o assento das válvulas de admissão e exaustão. A este anel metálico dá-se o nome de inserto para assento de válvula - FIG. 2.8 a.

Os insertos para assento de válvula são utilizados para vedação das regiões de admissão e exaustão de gases nas câmaras de combustão de motores automotivos, que operam sob severas condições de trabalho. Dentre os vários requisitos necessários para que um dado material suporte estas adversas condições de trabalho, citam-se: boa estabilidade térmica, resistência à corrosão, alta condutividade térmica e resistência ao desgaste. Outras características não diretamente ligadas à performance do material, mas também de grande importância, são: baixa massa específica, baixo custo e boa usinabilidade, pois estas características podem impactar diretamente nos custos de fabricação do componente bem como no desempenho do motor [Salgado, L. et al., 2000].

O objeto de estudo deste trabalho são os insertos de assento de válvulas, peças com o formato de um anel que são inseridas no cabeçote dos veículos à combustão interna. Sua finalidade é promover um par tribológico mais adequado com o assento das válvulas, permitindo melhores índices de isolamento da câmara de combustão e maior longevidade do conjunto.

Figura 2.8. a) Imagem de típicos insertos para assentos de válvulas. b) Desenho esquemático mostrando a posição onde o inserto é colocado no motor [Jesus Filho, E. S., 2006].

O funcionamento do par válvula-inserto passa por ciclos de duas etapas, diferentes para o conjunto de exaustão e admissão. No primeiro deles existe maior possibilidade de ocorrer oxidação do conjunto, devido às altas temperaturas a que são submetidas as peças, cerca de 700 °C. A resistência à oxidação dos materiais envolvidos é um fator de grande importância.

No conjunto de admissão as temperaturas são menores (aproximadamente 250 °C na superfície do inserto e 350 °C no assento da válvula), o que minimiza a ocorrência de oxidação, mas não diminui o severo desgaste pelo contato metal-metal, sobretudo para combustíveis que não contém chumbo, que poderia agir como lubrificante [Jesus Filho, E. S., 2006].

2.3 Metalurgia do pó

Metalurgia do pó é uma tecnologia de processamento na qual as peças são produzidas a partir de pós-metálicos. Nas técnicas de MP, os pós de matriz metálica são comprimidos no formato desejado para a peça, sofrendo um aquecimento posterior que permite uma melhor ligação microscópica entre as partículas [Jang, G. B., et al., 2000]. A temperatura utilizada neste aquecimento não atinge o limite de fusão dos metais usados, ficando usualmente de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão [Chiaverini, V., 2002].

Ouro, prata, cobre e ligas de ferro eram as matérias primas utilizadas. Artefatos de cobre foram encontrados no oriente médio, com datação de cerca de 3000 a.C. Após o desenvolvimento de ligas de cobre em 2000 a.C., objetos feitos

a partir dele foram amplamente utilizados no oriente médio e na China, devido a sua resistência e vantagens no processamento [Iervolino, F. 2009].

Entre considerações que mostram a importância tecnológica e comercial da MP, estão:

- Obtenção das peças sem necessidade de fusão completa dos metais;
- Utilização de pós-metálicos como matéria prima para as peças;
- Características físicas e estruturais diferenciadas, impossíveis de obter por outros processos metalúrgicos [Chiaverini, V., 2002] [Iervolino, F. 2009];
- Facilidade em compor diferentes ligas e redução de peso [Jang, G. B., et al., 2000];
- Possibilidade de se obter peças “*near net shape*” que em muitos casos dispensam operações complementares [Salgado, L. et al., 2000] [Jang, G. B., et al., 2000] [German, R. M., 1984] [Ambrozio Filho, F. et al., 2000] [Whittaker, D. 1998] [Delmonte, 1990];
- Os processos de produção podem ser automatizados para tornar a produção mais barata;
- Certas combinações de pós-metálicos e cerâmicas resultam em propriedades mecânicas, físicas e químicas que não são observadas pelos processos usuais de produção [GROOVER, 2010];
- A natureza porosa das peças obtidas por MP permitem a confecção de elementos auto-lubrificantes, seja por impregnação em fluidos que exercem essa função ou por acrescentar materiais com essas características na mistura de pós [Randall, M. G. 2005];
- O processo de fabricação via MP desperdiça pouca matéria prima. Cerca de 97% da matriz metálica são convertidos na peça final [German, R. M., 1984];
- Certos metais que são difíceis de trabalhar por outras técnicas podem ser base para produção peças via MP. É o caso dos filamentos de tungstênio usados em lâmpadas incandescentes [Kuhn, 1978] [Salgado, 1997];
- O processo traz um bom controle dimensional das peças produzidas, sendo possível alcançar tolerâncias da ordem de $\pm 0,13$ mm [Jang, G. B., et al., 2000].

A MP tem um grande campo de aplicações para materiais metálicos, sendo possível desenvolver muitos produtos aplicando essa técnica. Contudo ela trabalha dentro de certas limitações, não sendo aplicável para qualquer situação.

Algumas limitações e desvantagens associadas ao processo:

- As ferramentas e equipamentos utilizados na produção via MP tem custos elevados, tornando uma opção quase que exclusiva para produção em larga escala [Iervolino, F. 2009] [Santos, 1997];
- O armazenamento de pós-metálicos e sua manipulação compõem itens difíceis de lidar, sobretudo por conta da facilidade de degradação dos pós ao longo do tempo e o risco de explosão oferecido por determinados metais [Ambrozio Filho, F. et al., 2000];
- Deve-se ter cuidado com variações de densidade ao longo das peças fabricadas;
- Há peças cuja geometria não permite serem fabricadas via MP;
- Pós-metálicos passam por processos industriais para serem fabricados, que embutem no material um valor agregado, tornando seu preço mais elevado [Randall, M. G. 2005].

2.3.1 – Materiais de partida

Mais do que nos processos metalúrgicos convencionais, a matéria prima constitui um fator básico na metalurgia do pó, sobretudo no que diz respeito à sua uniformidade [German, R. M., 1984]. O controle rigoroso de todas as características deve ser realizado, a fim de se trabalhar com matérias primas cujo comportamento seja previsível.

Os vários processos para obtenção de pós-metálicos podem ser agrupados nas seguintes classificações:

- Deposição eletrolítica;
- Atomização de metais líquidos;
- Reações químicas e decomposições;
- Processamento mecânico de metais sólidos.

O processo de obtenção de pós-metálicos ferrosos via deposição eletrolítica possibilita produzir pós de grande pureza e alta compressibilidade. Inicia-se a produção em uma célula eletrolítica com a dissolução de um anodo de ferro em um eletrólito composto por uma solução de sulfato ferroso. Sob uma

voltagem aplicada, os íons de ferro são precipitados no catodo [Orlandin, J. et al. 2009]. Pode-se chegar aos pós-eletrolíticos por depósito compacto e duro, que pode ser moído, ou por depósito esponjoso ou pulverulento, que resulta em pó após leve raspagem do depósito catódico.

O controle de parâmetros durante a eletrodeposição é favorecido quando há elevadas densidades de corrente elétrica, baixas temperaturas de operação, altas viscosidades e baixas concentrações de íon metálicos. Pós de berílio, ferro e cobre são os mais comumente fabricados por deposição eletrolítica, mas também há produção de pós de níquel, cádmio, estanho, bismuto, prata e chumbo [German, R. M., 1984].

No processo de atomização de metais líquidos, um filete de metal na fase líquida é desintegrado por um ou mais jatos de gás ou líquido, em temperatura tal que promove a solidificação imediata do metal, em minúsculas partículas que constituem o pó metálico. As duas funções exercidas pelo jato de gás ou líquido são separar o filete de metal líquido em partículas e diminuir rapidamente a temperatura do metal, solidificando-o [Whittaker, D. 1998].

O ar é o elemento mais utilizado no processo de atomização a gás, enquanto o elemento mais aplicado para atomização por líquido é a água. Ambos elementos são mais econômicos quando comparados a outros gases e líquidos.

Figura 2.10 - a) Produção de pó metálico pelo método de atomização horizontal. **b)** Produção de pó metálico pelo método de atomização vertical [Randall, M. G. 2005].

Os pós-metálicos obtidos por atomização a gás têm suas partículas esféricas ou arredondadas. O processo se resume em pulverizar um filete de metal líquido com água ou gás, resfriando violentamente o metal e separando-o em diversas partículas que solidificam instantaneamente, como esquematizado na FIG 2.10. Os produtos apresentam altos teores de oxidação quando pulverizados com ar ou água, sendo necessário submeter o material a um processo de redução.

As partículas dos pós produzidos via atomização por líquidos são mais irregulares, característica que torna o produto mais compressível – o que é bastante desejável para metalurgia do pó. O formato das partículas obtidas depende de parâmetros como tensão superficial e viscosidade do metal líquido, vazão e velocidade do gás/líquido atomizante, de modo que a formação de partículas esféricas é favorecida por:

- Velocidade elevada do gás atomizante;
- Alta tensão superficial do metal líquido;
- Metal líquido com baixa viscosidade [German, R. M., 1984].

Pequenas adições de impurezas e suspensões sólidas podem modificar sensivelmente as tensões superficiais dos metais líquidos, motivo pelo qual a pureza dos metais a serem convertidos em pó deve ser controlada.

O processo mais comum para obtenção de pós-metálicos por reações químicas é a redução de óxidos metálicos, empregando-se agente redutor gasoso ou sólido (carbono). Os mais importantes pós-metálicos produzidos com esse processo são tungstênio, cobre, ferro e molibdênio [Orlandin, J. et al. 2009].

A produção de pós-metálicos via processo mecânico consiste em promover impactos consecutivos entre uma massa dura e o material a ser pulverizado. A moagem promovida por um moinho de bolas – tambor rotativo onde se coloca o metal a ser pulverizado e esferas duras, que fazem repetidas colisões – é um dos casos mais representativos dessa técnica. Os pós obtidos nesse processo são compostos de partículas duras, na maioria dos casos, devido à deformação a frio, fazendo necessário um recozimento posterior para seu amolecimento.

Figura 2.11 – Produção de pós-metálicos por moagem em tambor de esferas [Randall, M. G. 2005].

Para avaliar como os efeitos do processo de fabricação influenciam nas características finais do pó metálico, deve-se usar técnicas de mensuração de características das partículas. As características mais importantes para pós-metálicos incluem:

- Estrutura da partícula (incluindo composição química e tamanho de grão);
- Dimensão das partículas (distribuição uniforme dos tamanhos de grãos);
- Formato das partículas (propriedades como densidade aparente, área superficial e rendimento) [Whittaker, D. 1998].

2.3.2 – Compactação

Entende-se por compactação a moldagem de determinado material em um molde, bem como a aplicação de pressão. Aplicando-se pressão sobre as partículas de pó há uma deformação, o que traz um acréscimo no contato entre as partículas, preenchendo as regiões vazias. Em tal processo observa-se uma quebra da camada de óxido superficial das partículas, gerando a união de metal com metal em diversos pontos da peça, proporcionando deformação por cisalhamento entre as superfícies metálicas e consequente soldagem a frio.

A assimetria entre as forças que uma partícula gera sobre a outra é responsável por promover a deformação por cisalhamento, o que justifica que partículas mais irregulares são densificadas mais facilmente na etapa de compactação do que as partículas esféricas. [Schatt, W; WIETERS, K., 1997]

O processo de compactação é um dos mais importantes na via de produção por MP. A viabilidade econômica do processo depende diretamente dessa fase, sobretudo na habilidade de produzir componentes com formato e dimensões o mais próximo do necessário. As dimensões das peças obtidas depende do formato das ferramentas utilizadas na prensa.

Figura 2.12 – Esquema do ciclo operacional de uma prensa uniaxial, compactando o pó [Randall, M. G. 2005].

Na compactação de metais utiliza-se uma pressão tipicamente entre 450 e 600 N/mm², considerada alta. Eventuais defeitos resultantes de enchimento não uniforme na cavidade da matriz de compactação não podem ser corrigidos em etapas posteriores. Para a produção de metais de alta densidade a verde, necessita-se de um elevado transporte de massa por rearranjo de partículas e por deformação plástica na etapa de conformação do pó, mas por outro lado é preciso um menor transporte de massa na etapa de sinterização se comparado com os materiais cerâmicos, apenas sendo necessário promover continuidade da matéria entre as superfícies de contato das partículas, geradas na compactação [Lenel, F.V., 1980] [Amim K.E., 1987].

2.3.3 - Sinterização

A sinterização é um processo de difusão no estado sólido, que produz ligações entre as partículas do pó, promovendo propriedades funcionais para a peça. [Ambrozio Filho, F. et al., 2000] O compactado a verde (termo usado para descrever as peças já compactadas, mas que ainda não foram sinterizadas) é aquecido até uma temperatura inferior à de fusão do metal base. Geralmente este aquecimento é promovido em esteiras de fornos contínuos, com atmosfera controlada para proteger o material da ação do oxigênio.

A sinterização pode ser também definida como o processo pelo qual os agregados de pós compactados ou não são transformados em corpos maciços, através de mecanismos de transporte atômico difusional a temperaturas abaixo do ponto de fusão do constituinte principal. Ocorre durante o processo redução de energia livre do sistema através da diminuição da superfície específica do material. Resulta daí a formação de contornos de grãos e crescimento de pescoço (FIG. 2.13) entre as partículas, levando o sistema à densificação e consequente contração volumétrica [Loberto, A. et al. 2009].

A temperatura de sinterização para peças de ferro ou aço carbono fica entre 1110 °C e 1150 °C. O período de sinterização varia em função das dimensões da peça a ser sinterizada, sendo necessário permanecer no forno tempo suficiente para que o aquecimento seja homogêneo.

Figura 2.13 – Exemplo da ligação entre as partículas de pó metálico, com formação do “pescoço” na etapa de sinterização. [Randall, M. G. 2005]

Geralmente a sinterização é a última etapa da produção via MP. Contudo algumas peças podem necessitar de propriedades especiais, obtidas através de processos posteriores como tratamento térmico, recompressão, impregnação, eletrodeposição ou usinagem [Ambrozio Filho, F. et al., 2000].

2.3.4 – Tratamentos termoquímicos e térmicos para ligas ferrosas

As peças obtidas por MP podem ter suas características melhoradas usando-se tratamentos térmicos e termoquímicos. É possível incrementar parâmetros como dureza, resistência mecânica e resistência ao desgaste levando os produtos para serem recozidos, temperados ou endurecidos superficialmente. Da mesma forma que se tratam peças obtidas por vias de metalurgia convencionais, as peças oriundas da MP podem ser tratadas para se obter características diferenciadas como dureza superficial, por exemplo. As alterações dependem diretamente da aplicação final das peças.

A resposta aos tratamentos térmicos pode ser diferente em peças obtidas via MP em função da presença de poros, que reduzem a condutividade térmica e, por consequência, a temperabilidade. Outro aspecto que pode ocasionar diferenças durante os tratamentos térmicos é a variação química/microestrutural localizada. A porosidade também pode ser um fator limitante para alguns tipos de tratamento [Pallini, M. A. T. 2009].

2.4 Usinagem

Normalmente a produção via MP proporciona peças com dimensões próximas à desejada. Para determinados casos é necessário utilizar processos de usinagem a fim de moldar formas especiais como furos, roscas, orifícios transversais à direção de compactação e ajustes para tolerâncias muito apertadas [Ambrozio Filho, F. et al., 2000]. No entanto certas características exigem que se adote um processo posterior de usinagem, como por exemplo:

- Tolerâncias dimensionais extremamente apertadas;
- Quando a peça exigir utilização de ferramental muito fino, diminuindo a vida útil de um punção, por exemplo;
- Formação de canais, furos, roscas e rebaxos perpendiculares à direção de prensagem [Pallini, M. A. T. 2009].

A porosidade dos materiais sinterizados os torna mais difíceis de usar em

ralação às peças obtidas por meio da metalurgia convencional. Os poros interrompem a continuidade do corte, provocando vibração do sistema e desgaste prematuro nas ferramentas de usinagem. Alguns recursos podem ser adotados para melhorar a usinabilidade dos sinterizados:

- Aplicação de elementos ou compostos que lubrificam as ferramentas de corte, ajudando a quebrar os cavacos. Entre eles estão o MnS, S, Te, BN, Se e MoS₂ [Pallini, M. A. T. 2009];
- Quando se usar pós de ferro ou ligas de aço, trabalhar com densidade acima de 6,9 g/cm³;
- Escolha correta da liga;
- Processo de usinagem adequado ao sinterizado, utilizando ferramenta, avanço, refrigeração e velocidade de corte em função do material a ser trabalhado.

2.4.1 – Usinagem e usinabilidade

Usinagem é o nome dado a uma operação ou tratamento mecânico superficial que, por meio de máquina operatriz, sofra uma conformação. Aplica-se sobre uma pequena área deste material uma força concentrada, utilizando ferramenta de corte com ação cisalhante. Assim se pode conferir dimensão, forma e acabamento planejados a uma peça. [Marcondes, F. C., 1990] [Black et. al., 1996]

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que, por meio de um valor numérico comparativo, seja ele um índice ou uma porcentagem, expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um metal, comparando-o com outro tomado como padrão. [Baptista A. L. B., 2002] As propriedades de usinagem de um metal demonstram seu efeito em grandezas mensuráveis pertinentes ao processo de fabricação como força de usinagem, temperatura de corte, vida útil da ferramenta, acabamento superficial da peça etc.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Composição das misturas de pós metálicos usadas no trabalho

Uma das vantagens da metalurgia do pó é a possibilidade de se trabalhar com misturas feitas a partir da união de diferentes pós-metálicos, nas mais diversas proporções. No presente trabalho buscou-se analisar duas misturas derivadas de tese de Doutorado concluída em 2006, por Edson Souza de Jesus Filho, na qual foram analisadas misturas contendo aço rápido tipo AISI M3/2. [Jesus Filho, E. S., 2006]

As mesmas proporções de pós-metálicos foram mantidas substituindo o referido aço por dois outros tipos, aço ferramenta tipo AISI D2 e aço ao molibdênio tipo AISI M2. A escolha de cada um dos componentes das misturas justificou-se por:

- **Fe** – Redução na temperatura de sinterização e no custo da matéria-prima. A temperatura de sinterização do ferro é da ordem de 1010 °C a 1150 °C. Devido à boa compressibilidade do ferro há uma tendência a melhorar a resistência a verde do componente;
- **MnS** – Redução no atrito durante a operação de usinagem da sede do assento, bem como promover melhorias na usinabilidade dos insertos – etapa pela qual terão de passar para serem instalados nos cabeçotes e para um encaixe perfeito com o assento das válvulas;
- **Estearato de zinco** – Cera em pó usada para facilitar a remoção das peças após compactação. O estearato de zinco evapora da peça na etapa de sinterização, com o aumento vertiginoso da temperatura;
- **Cu** – Acrescentado por aumentar a usinabilidade, a condutibilidade térmica, eliminar efeito de corte intermitente e por ser um importante ativador no processo de sinterização por fase sólida. Seus efeitos benéficos no processo de usinagem praticamente se equivalem aos do chumbo e da resina acrílica [Fujiki A., et al., 2001];
- **NbC** – Aumentar a resistência mecânica da peça, trazendo resultados maiores nos testes de dureza e de resistência à ruptura radial;
- **Aço rápido AISI M3/2** – Utilizado na composição da liga 1, desenvolvida e testada no trabalho precursor deste mestrado;

- **Aço rápido AISI D2** – Possui grande resistência ao desgaste abrasivo e adesivo;
- **Aço rápido AISI M2** – Apresenta elevada manutenção de dureza a quente;
- **C (grafite)** – Redução do coeficiente de atrito para a etapa de compactação.

Tabela 3.1 Composição das misturas metálicas propostas, em porcentagem em massa.

	Quantidade em porcentagem		
	Mistura M3/2	Mistura M2	Mistura D2
Aço rápido AISI M3/2	43,6	--	--
Aço rápido AISI M2	--	43,6	--
Aço rápido AISI D2 (*)	--	--	43,6
Fe (**)	43,6	43,6	43,6
NbC	2,0	2,0	2,0
C (grafite)	0,3	0,3	0,3
MnS	0,5	0,5	0,5
Cu (***) (infiltrante)	10,0	10,0	10,0
Estearato Zn	0,8	0,8	0,8

(*) – Fornecido pela empresa Högans. Seu nome comercial é PX-M3-06 NSP;

(**) – Fornecido pela empresa Högans. Seu nome comercial é ASC 100.29;

(***) – Fornecido pela empresa Metalpó. Infiltrante importado cujo nome comercial é EF-98S.

-- Ausente.

Todos os pós utilizados na composição das misturas foram passados por peneiras de granulometria 230 Mesh, o que corresponde a uma abertura de 65 µm [Randall, M. G. 2005]. O processo de peneiramento foi realizado com o intuito de remover impurezas dos pós e garantir uniformidade para as misturas. O tamanho médio ou mediano das partículas de cada componente não pôde ser garantido por esse processo, mas sim durante a etapa de análise granulométrica.

A quantidade de pós a ser utilizada foi um pouco menos de 1800 g por mistura. Os pós foram pesados e separados antes de promover a mistura, como mostram as FIG. 3.1 e 3.2.

Figura 3.1 – Detalhe da separação dos pós por massa, usando uma balança de precisão.

Figura 3.2 – Componentes da mistura separados e nomeados.

A composição química dos materiais utilizados para compor as misturas foi obtida por EDS. Os valores obtidos são mostrados na TAB. 3.2.

3.2 Morfologia dos pós

Um dos mais importantes pré-requisitos para produção de componentes de alta qualidade via MP é a consistência e a qualidade dos pós metálicos adotados. Os pós metálicos e suas características influenciam diretamente o comportamento dos processos de transporte das misturas, compactação e sinterização, naturalmente trazendo consequências nas propriedades funcionais do produto final. [Orlandin, J. et al. 2009]

Tabela 3.2. Composição química semi-quantitativa (% em massa) obtida por espectroscopia de energia dispersiva em microscópio eletrônico de varredura dos aços utilizados neste trabalho.

Material	C	Mo	W	Mn	Cr	Si	V	Fe
AISI M3/2 nominal	0,96	6,08	5,72	0,28	3,96	0,30	2,97	Bal.
AISI M2	...	6,15	5,65	--	3,94	--	1,87	Bal
AISI D2	...	1,03	--	1,33	11,8	1,31	1,46	Bal

-- Ausente. ... Não determinado.

O tamanho das partículas é outra das mais importantes características na MP. Trata-se da determinação das dimensões que tem as partículas constituintes do pó metálico, dependente da técnica de medição, parâmetro específico a ser medido e do formato da partícula [Randall, M. G. 2005]. Para uma análise precisa é necessário conhecer tanto o tamanho médio das partículas como seu formato, motivo pelo qual costuma-se realizar ambos ensaios.

O pó de aço rápido AISI M3/2 utilizado na composição da mistura M3/2 foi fornecido pela Höganäs, sob denominação comercial de PX-M3-06 NSP. Suas partículas tem tamanho médio de 95,96 μm e tamanho mediano de 91,82 (D_{50}) (FIG 3.4).

Figura 3.3 – Micrografia por elétrons secundários obtida no MEV, mostrando o aspecto morfológico irregular das partículas de aço rápido AISI M3/2.

Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de aço rápido AISI M3/2.

A morfologia do aço rápido AISI M3/2 mostrou-se diferente da observada nos aços AISI M2 e AISI D2, tendo os grãos do aço AISI M3/2 um aspecto irregular mostrado na FIG. 3.3, enquanto os aços AISI M2 e AISI D2 tem um aspecto esférico - FIG.3.5 e 3.7, respectivamente. As caracterizações morfológicas foram feitas de acordo com a classificação sugerida por [Randall, M. G. 2005].

Figura 3.5 - Micrografia por elétrons secundários obtida no MEV, mostrando o aspecto morfológico esférico das partículas de aço rápido AISI M2.

O pó de aço rápido AISI M2 apresentou um tamanho médio das partículas em 45,70 µm e tamanho mediano 42,88 µm (D_{50}), vide FIG. 3.6.

Figura 3.6 – Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de aço rápido AISI M2.

Figura 3.7 - Micrografia por elétrons secundários obtida no MEV, mostrando o aspecto morfológico esférico das partículas de aço rápido AISI D2.

O aço rápido AISI D2 apresentou um tamanho médio das partículas de 43,15 μm e tamanho mediano de 41,03 μm (D_{50}), vide FIG. 3.8.

Figura 3.8 - Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de aço rápido AISI D2.

A utilização de pó de ferro foi importante tanto para reduzir o custo da matéria prima sugerida para as mistura - já que o elemento corresponde a 43,6% cada uma das misturas propostas - quanto por ser um pó metálico de característica microestrutural irregular, como se pode notar na FIG. 3.9. Essa irregularidade colabora para o efeito de cisalhamento quando se compacta o pó metálico, ajudando na agregação de partículas e consecutivo processo de soldagem a frio.

Figura 3.9 - Micrografia por elétrons secundários obtida no MEV, mostrando o aspecto morfológico irregular das partículas de pó de Fe ASC.

O pó de ferro ASC utilizado nas misturas foi produzido pela Höganäs, sob nome comercial de ASC 100.29. Suas partículas apresentam tamanho médio de 136,91 µm e tamanho mediano de 96,24 µm (D_{50}), vide FIG. 3.10.

Figura 3.10 - Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de Fe ASC.

O sulfeto de manganês (MnS) utilizado na composição das misturas foi fornecido pela Höganäs. A composição deste sulfeto tem como constituintes principais 63,7% de manganês, 35,0% de enxofre e 1% de oxigênio. Seu formato morfológico é poroso (FIG. 3.11) [Randall, M. G. 2005].

Figura 3.11 - Micrografia obtida por MEV, mostrando o aspecto morfológico poroso das partículas do pó de MnS.

O sulfeto de manganês (MnS) utilizado na composição das misturas teve o tamanho médio das partículas de 6,28 µm e tamanho mediano 5,98 µm (D_{50}), vide FIG 3.12.

Figura 3.12 - Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de MnS.

O carboneto de nióbio, mostrado na FIG 3.13, foi adicionado às misturas no intuito de elevar a dureza de cada uma delas. As partículas têm um aspecto morfológico irregular e tamanho médio de 2,3 μm (FIG. 3.14). A distribuição de tamanho de partícula para o pó de carboneto de nióbio foi tirada da literatura [Jesus Filho, E. S., 2006]. Apesar de sua quantidade relativa ser baixa, de apenas 2% em cada uma das misturas, o carboneto de nióbio tem capacidade de aumentar consideravelmente a resistência e dureza das peças obtidas. [Simões, D. G. et al. 2012] [Furukawa, M. 2007]

Figura 3.13 - Micrografia obtida por MEV, mostrando o aspecto morfológico poroso das partículas do pó de NbC.

Figura 3.14 – Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de NbC [Jesus Filho, E. S., 2006].

A redução de atrito entre as ferramentas da prensa e o pó metálico é potencializada pelos pós de sulfeto de manganês e de grafite [Loberto, A. et al. 2009], mostrados nas FIG. 3.11 e 3.15 respectivamente. Sua colaboração também se dá na homogeneidade das misturas enquanto processadas pelo misturador. O pó de grafite apresenta morfologia angular em suas partículas (FIG. 3.15), que tem tamanho médio de 14 µm (FIG. 3.16). A distribuição de tamanho de partícula para o pó de grafite foi consultada na literatura [Jesus Filho, E. S., 2006].

A cera em pó denominada estearato de zinco é um produto encontrado comercialmente. Não foram realizadas caracterizações físicas ou morfológicas, já que sua adoção para compor as misturas deu-se apenas por ser um lubrificante sólido. O estearato de zinco é eliminado na etapa de sinterização, acima de temperaturas da ordem de 130 °C.

Figura 3.15. Micrografia por elétrons secundários obtida no MEV, mostrando o aspecto morfológico angular e na forma de escamas do pó de C (grafite).

Figura 3.16 – Curva de distribuição granulométrica obtida na medição do tamanho da partícula do pó de grafite, [Jesus Filho, E. S., 2006].

Foi realizado o cálculo do tamanho médio das partículas para cada uma das três misturas, através de média ponderada entre os elementos constituintes e suas respectivas dimensões de partículas. A mistura M3/2 teve o maior tamanho médio de partículas, com 112,95 μm . Logo depois vem a mistura M2, com 88,59 μm e a mistura D2, com 87,36 μm vide TAB. 3.3.

O elemento cobre não foi considerado nos cálculos indicados na TAB 3.3 por não ter sido acrescentado às misturas antes da etapa de compactação. O cobre foi compactado separadamente no formato de finos anéis, colocados sobre os insertos na etapa de sinterização. Por esse motivo o tamanho médio das partículas de cobre não influenciou no tamanho médio das misturas.

Como se procurou manter os mesmos padrões de compactação, sinterização e procedimentos nos ensaios para as três misturas, a diferença de tamanho médio poderia ser um dado relevante para explicar comportamentos distintos entre insertos obtidos com as diferentes misturas.

Tabela 3.3 – Tamanho médio das partículas de cada constituinte das misturas. Média ponderada do tamanho médio das partículas para cada mistura proposta.

	Diâmetro médio (μm)	Porcentagem		
		Mist. M3/2	Mist. M2	Mist. D2
Aço M3/2	95,96	43,6	--	--
Aço M2	45,68	--	43,6	--
Aço D2	43,15	--	--	43,6
Pó de Fe	136,91	43,6	43,6	43,6
MnS	6,28	0,5	0,5	0,5
NbC	2,3	2	2	2
C	14	0,3	0,3	0,3
		Mist. M3/2	Mist. M2	Mist. D2
Diâmetro médio das misturas (μm)		112,95	88,59	87,36

-- Ausente.

3.3 Mistura dos componentes

Devido à ausência de um misturador de pequeno porte no CCTM / IPEN foi necessário procurar empresas para homogeneizar a mistura. A empresa Höganäs disponibilizou o serviço, bem como a parcela de pó de ferro ASC puro usado nas misturas e o aço tipo AISI M3/2. Todos os componentes listados na TAB. 3.1 foram postos para serem misturados, exceto o cobre, que foi adicionado por infiltração aos insertos durante o processo de sinterização.

O misturador de pequeno porte disponibilizado pela Höganäs é do tipo Lödige e deve ser usado por curtos intervalos de tempo, pois do contrário o pó pode ter sua resistência a verde prejudicada devido a uma eficiente ação de cisalhamento promovida pelas pás em seu interior. O tempo de mistura usual de processamento varia entre 1 e 5 minutos [Orlandin, J. et al. 2009]. Cada uma das misturas foi batida por 5 minutos a 1715 RPM.

Figura 3.17 – a) Detalhe das pás do misturador tipo Lödige; b) Vista completa do equipamento que realizou as misturas; c) Aspecto da mistura durante o processo.

3.4 Compactação

As misturas foram compactados na forma de anéis com uma prensa semi-automática uniaxial com capacidade de carga de 100 toneladas força, ilustrada na FIG 3.18, localizada no Centro de Processamento de Pós (CPP) - laboratório situado no CCTM/IPEN-USP. A primeira etapa do trabalho foi promover a operacionalização da prensa hidráulica, colocando-a para funcionar e adequando-a ao trabalho pretendido.

A manutenção desta prensa foi uma etapa trabalhosa do projeto. Para conter vazamentos de fluido foi preciso trocar diversas conexões. A substituição de tubos hidráulicos rígidos por mangueiras trouxe dificuldades durante a montagem do aparato, pois ao adaptar as mangueiras houve persistentes vazamentos nos pontos onde foram instaladas. Tais substituições são apontadas com setas na FIG 3.19. Originalmente as tubulações traziam anilhas para vedar as conexões. Por trabalhar com altas pressões foi necessário aperfeiçoar as dimensões das novas anilhas, buscando quem produzisse terminais e anilhas para as mangueiras adaptadas.

(a)

(b)

Figura 3.18 – a) Vista frontal da prensa hidráulica instrumentada ; b) Prensa hidráulica vista por trás.

(a)

(b)

Figura 3.19 – a) Tubulações e manômetros antigos; b) Mangueira hidráulica no lugar das conexões rígidas. Manômetros novos.

Muitas das substituições realizadas no equipamento apresentaram defeitos de funcionamento antes que se atingisse uma solução efetiva. Um dos defeitos mais recorrentes foram os vazamentos nas novas mangueiras, como os que ocorreram nas pequenas tubulações mostradas na FIG 3.20.

A compra e instalação de novos manômetros também foram necessárias, pois os que estavam no maquinário encontravam-se quebrados, vazando e em alguns casos faltantes. Optou-se pela instalação de manômetros com fundo de escala de 30 a 50% maior do que os retirados, já que alguns estavam comprometidos por excesso de pressão e apresentavam os ponteiros amassados por bater no fim da escala.

Figura 3.20 – Detalhe do encaixe feito entre as mangueiras e a central de válvulas.

Antes de iniciar a operação foram verificadas as instalações da prensa que ficam fora do laboratório, na casa de máquinas, indicada na FIG. 3.21. Nível e estado do fluido hidráulico, limpeza, reposição de manômetros e acerto do sistema de arrefecimento foram as etapas realizadas nessa fase.

Terminada a etapa de verificações preliminares, a prensa foi ligada e começou-se a operar em caráter de testes. A sequência lógica de funcionamento do software foi mapeada com a ajuda de um antigo operador, o Sr. Carlos Alberto Beraldo, que solicitamente passou pelo IPEN. Ele elaborou um procedimento de operação do equipamento, com os passos a serem seguidos.

As alturas de trabalho da prensa foram ajustadas e compactou-se algumas pastilhas apenas como teste de equipamento. Mesmo não sendo o formato alvo

do estudo essa primeira compactação foi importante para aprender o ciclo de operação do equipamento.

a)

b)

Figura 3.21 – a) Vista do equipamento instalado na casa de máquinas, anexa ao laboratório. b) Detalhe do sistema de arrefecimento e manômetro (apontados com setas).

Para começar a produção dos insertos foi necessário realizar a troca dos punções da prensa, retirando os que lá estavam, com formato de pastilhas cilíndricas, e substituindo por punções com a forma desejada para os insertos, como mostram as FIG. 3.22 e 3.23.

Por se tratar de uma prensa de compressão dupla trabalha-se com duas peças com o formato que se deseja obter, um punção superior e um inferior, para que o pó metálico fique entre os dois durante o processo de compactação. Quando se retirou o punção inferior foi constatado que o componente mecânico na qual ele é montado estava travado. Trata-se de um cilindro com rosca externa de perfil quadrado, preso a outra peça de rosca interna. Possivelmente uma operação indevida no passado danificou essas roscas, que precisaram ser refeitas para que o projeto pudesse seguir. As peças foram removidas e levadas até uma oficina especializada. A FIG. 3.24 ilustra o procedimento de usinagem a que foram submetidas essas peças.

Devido ao peso do conjunto e sua posição de difícil acesso na prensa, foram necessárias duas pessoas para instalar as peças novamente no equipamento, com o devido cuidado para que uma queda ou tentativa de encaixe

forçado não danificasse novamente as roscas. A posição do conjunto montado na prensa é mostrada na FIG. 3.25.

Figura 3.22 – Vista frontal em corte e vista superior do inserto alvo de estudo. Dimensões em mm.

a)

b)

Figura 3.23 – a) Conjuntos de matrizes e punções existentes na prensa; b) Punções usados no desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 3.24 – a) Cilindro e peça externa com problemas no encaixe da rosca. b) Detalhe da operação de usinagem em torno mecânico. c) Etapa de acabamento manual na rosca retificada.

Figura 3.25 – a) Localização do conjunto na mesa inferior da prensa, indicado com uma seta; b) Detalhe da fixação do conjunto no equipamento.

Tendo finalizado a manutenção e montagem do conjunto, a prensa recebeu o par de punções corretos, como mostrado na FIG. 3.26, e ficou pronta para operar.

Figura 3.26 – a) Vista da matriz e punção inferior – cavidade onde entra o pó metálico. b) Punção superior fixado na prensa.

A prensa foi configurada para compactar os insertos com 23 toneladas força. Chegou-se a esse valor de carga levando em consideração a pressão média aplicável para aços, da ordem de 700 MPa [Randall, M. G. 2005], e a área superficial do inserto:

$$\begin{aligned}
 P &= 700 \text{ MPa} = 7 \cdot 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)} \\
 \text{Área superficial do inserto} &= A = 3,18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \\
 \text{Força} &= P \cdot A = 222600 \text{ N} = 22714,28 \text{ kgf} \approx 23 \text{ ton.f}
 \end{aligned}$$

Os anéis de cobre foram prensados separadamente, com massa em torno de 10% da massa dos anéis de aço. A altura dos anéis de cobre ficou reduzida em relação à altura dos insertos de aço, como se pode notar pela FIG.3.27. A incorporação do elemento cobre foi realizada em etapa posterior, no momento de sinterização das peças, levando-as ao forno com os anéis de cobre sobrepostos aos anéis de aço - ilustrado na FIG.3.28.

Figura 3.27 – Detalhe dos anéis de cobre compactados separadamente. Observar que a espessura dos anéis de cobre é muito reduzida em relação aos anéis de aço.

Figura 3.28 – Insertos compactados com o anel de cobre por cima, da maneira como foram ao forno de sinterização.

Foram produzidos lotes com cerca de 40 insertos para cada uma das misturas. Todos os anéis (cobre e aço) foram pesados e tiveram seus resultados tabulados. Nessa etapa foram montados os conjuntos com um inserto e um anel de cobre, como mostra a FIG. 3.28, procurando escolher as peças de acordo com as massas tabuladas - mantendo aproximadamente a massa dos anéis de cobre em 10% da massa dos insertos.

3.5 Sinterização

A sinterização das amostras foi realizada em forno industrial nas instalações da empresa Combustol & Metalpó (FIG. 3.30) em atmosfera controlada (70% de hidrogênio e 30% nitrogênio), à 1150 °C por 40 minutos. Foi observado um tempo de patamar de 35 minutos a 600 °C para permitir que todo o estearato de zinco adicionado à mistura fosse eliminado nesse período, antes da efetiva etapa de sinterização das misturas. A FIG. 3.29 mostra o ciclo térmico a que foram submetidos os insertos, com informações sobre o tempo de duração e temperatura de patamar, além da taxa média das rampas aquecimento e resfriamento.

Figura 3.29 – Ciclo de térmico adotado na etapa de sinterização dos insertos.

Os patamares de temperatura na sinterização dos insertos foram os mesmos indicados no trabalho que propôs a mistura M3/2 [Jesus Filho, E. S., 2006], procurando uniformizar o tratamento das misturas afim de melhor compará-las quanto à composição química.

Figura 3.30 – Detalhe da área de fornos na empresa Metalpó.

3.6 Caracterização física dos insertos

3.6.1 Densidade

Para a medição da densidade hidrostática utilizou-se o método da imersão em água, em conformidade com a norma ASTM C373-88 [ASTM C 373-88, 1999], com tempo de fervura igual a 1 hora. Após secagem a 150 °C em estufa por 1,5 h, determinou-se as massas secas das amostras em balança analítica com precisão de 0,0001 g. Conhecendo-se a densidade da água, massa úmida, imersa e seca dos insertos, suas densidades foram calculadas utilizando a Eq. 1.

$$d = (m_{\text{seca}} / (m_{\text{úmida}} - m_{\text{imersa}})) \times d_{\text{água}} \quad (1)$$

Onde:

d = Densidade hidrostática (g/cm³)

m_{seca} = Massa seca da amostra (g)

$m_{\text{úmida}}$ = Massa úmida da amostra (g)

m_{imersa} = Massa aferida com a amostra imersa em água (g)

$d_{\text{água}}$ = Densidade da água (g/cm³)

Foram ensaiados cinco insertos para cada uma das misturas.

3.6.2 Dureza aparente

Os ensaios para determinação da dureza aparente do material foram feitos na escava Vickers (HV), de acordo com a norma ASTM E-92-82, [ASTM E 92-82, 1982] e de acordo com a Eq. 2, utilizando carga de 100 kgf e penetrador piramidal. Foram desconsideradas as indentações que caracterizaram a existência de poros sub-superficiais, analisando os valores obtidos pela dispersão de resultados. Nesses casos realizou-se novas indentações feitas em outras regiões das mesmas amostras.

$$HV = \frac{2.F.\text{sen}\frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

HV = Dureza na escala Vickers;

F = Carga aplicada pelo penetrador piramidal sobre a peça, medida em kgf;

d = Média aritmética das duas diagonais da indentação impressa na peça, como mostra a FIG. 3.31.

Figura 3.31 – Detalhe de uma marca impressa em um inserto, com as diagonais indicadas por d_1 e d_2 .

Os insertos escolhidos para a realização das indentações tiveram suas faces homogeneizadas com lixa de granulometria 220, para garantir que ficassem planas, permitindo marcações precisas do diamante na peça. Foram ensaiados

três insertos para cada mistura, marcando ambos os lados com o indentador. Esse cuidado foi tido para aumentar a confiabilidade dos ensaios realizados.

3.6.3 Ensaio de resistência à ruptura radial

Os ensaios de resistência à ruptura radial foram realizados diretamente nos insertos obtidos, seguindo a norma MPIF 35 [MPFI Standard 35, 1965] O ensaio consiste em comprimir o anel radialmente até sua ruptura. A resistência à ruptura radial dos insertos foi calculada de acordo com a Eq. 3.

$$K = P \cdot \left(\frac{D-e}{L \cdot e^2} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

K = Resistência à ruptura radial (N/mm²) ou (MPa)

D = Diâmetro externo do inserto (mm)

e = Espessura da parede do inserto (mm)

L = Altura do inserto (mm)

P = Máxima carga suportada pelo inserto antes do surgimento da primeira trinca (N).

Foram ensaiados quatro insertos para cada uma das misturas propostas.

3.7 Caracterização microestrutural dos insertos

Para a caracterização microestrutural foram preparadas amostras de cada um dos materiais para análise em microscópio eletrônico de varredura. As amostras foram embutidas em baquelite e submetidas a uma sequência de polimentos de acordo com a seguinte ordem:

- Lixas de grana 120 → 220 → 360 → 600 → 1200;
- Politriz com panos e pasta de diamante 6 µm → 3 µm

Utilizou-se solução de álcool e glicerina na proporção de 2/1 como lubrificante no polimento com pasta de diamante. As amostras foram observadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos cerca de 40 insertos para cada uma das três misturas de ligas. Desses foram selecionados para realização dos ensaios aqueles com dimensões mais próximas do pretendido (FIG 3.22), que apresentaram infiltração do cobre adequada e que não exibiam defeitos visíveis como trincas ou deslocamentos. Sobre as propriedades mecânicas de cada uma das misturas obtidas, destacam-se os valores organizados na TAB. 4.1.

Tabela 4.1 – Densidade hidrostática dos insertos sinterizados, dureza e resistência radial de cada uma das misturas analisadas.

Materiais	Densidade hidrostática (g/cm ³)	Dureza (HV)	Resistência radial (MPa)
Mistura M3/2	7,23 ± 0,29	531 ± 56	1024 ± 32
Mistura M2	7,39 ± 0,11	456 ± 21	595 ± 48
Mistura D2	7,33 ± 0,02	410 ± 22	945 ± 81

Os insertos obtidos a partir da mistura M2 tiveram os maiores valores no ensaio de densidade hidrostática (7,39 g/cm³). Logo após vieram as peças obtidas com a mistura D2, medindo 7,33g/cm³, e os insertos obtidos com a mistura M3/2, com 7,23g/cm³, como mostra a FIG.4.1.

Figura 4.1 – Gráfico da densidade dos insertos sinterizados, em (g/cm³), com as respectivas barras de desvio padrão.

Os insertos obtidos com a mistura D2 apresentaram os menores valores nos ensaios de dureza Vickers, como se observa na FIG.4.2. A mistura M2 teve medições de dureza intermediárias entre as outras duas, ficando a mistura M3/2 com a posição de mais dura dentre as três.

Figura 4.2 – Gráfico da dureza Vickers dos insertos sinterizados, em (HV₁₀₀), com as respectivas barras de desvio padrão.

Os insertos obtidos com a mistura denominada M3/2 apresentaram os maiores valores no teste de resistência à ruptura radial, suportando em média de 1118 MPa a 1245 MPa. (TAB 4.1). Em ordem decrescente de resistência vêm as peças feitas com a mistura D2 - com valores entre 864 MPa e 1026 MPa - e os

insertos compactados com a mistura M2, resistindo em média de 547 MPa a 643 MPa. Apesar do valor médio observado para a mistura M3/2 ser maior que o valor médio da mistura D2, quando se considera os valores de desvio padrão pode-se notar que ambas as misturas tem desempenho equivalente, como mostra a FIG.4.3. A mistura M2 apresentou os menores valores de resistência à compressão radial entre as três analisadas.

Geralmente maior dureza do material está associada com maior resistência mecânica, o que foi válido para os ensaios realizados com a mistura M3/2. Entretanto tal relação não foi observada na mistura M2 (FIG 4.2 e FIG 4.3). Um possível motivo dessa diferença é a elevada porosidade dos insertos obtidos com a mistura M2, como mostra a FIG. 4.4.

Alguns dos insertos embutidos foram analisados em microscópio ótico para observação de imperfeições maiores e para orientar na remoção dos riscos durante o processo de polimento das peças embutidas em baquelite. As imagens obtidas por microscopia ótica serviram também para uma visualização superficial sobre a porosidade das peças.

Figura 4.3 – Gráfico da resistência à compressão radial dos insertos sinterizados, em [MPa], com as respectivas barras de desvio padrão.

Figura 4.4 – Gráfico da porosidade relativa para os insertos obtidos com cada uma das misturas.

Figura 4.5 – Imagem feita por microscopia ótica do inserto obtido com a mistura M3/2, destacando a porosidade da peça. A mistura M3/2 teve uma porosidade de 4,9%.

A porosidade presente nas secções transversais dos insertos embutidos em baquelite são visíveis nas FIG. 4.5, 4.6 e 4.7, para as misturas M3/2, M2 e D2 respectivamente. Utilizando software de tratamento de imagens, pôde-se comparar a quantidade de pixels escuros em cada uma das micrografias. Apesar de não ser um método preciso, foi suficiente para comparar imagens das amostras obtidas sobre a quantidade de pontos escuros - poros - em cada uma delas. A porosidade da mistura M3/2 foi de 4,9%. A mistura M2 apresentou uma porosidade de 14,2%, enquanto que a da mistura D2 foi de 6,2%.

Figura 4.6 – Imagem feita por microscopia ótica do inserto obtido com a mistura M2, destacando a porosidade da peça. A mistura M2 teve uma porosidade de 14,2%.

Figura 4.7 – Imagem feita por microscopia ótica do inserto obtido com a mistura D2, destacando a porosidade da peça. A mistura D2 teve uma porosidade de 6,2%.

Figura 4.8. Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) de um inserto obtido com a mistura M3/2, com elementos identificados por EDS.

As regiões onde se observou presença de ferro puro têm coloração diferente das demais áreas nas imagens. Percebe-se que os elementos constituintes dos aços rápidos AISI M3/2, M2 E D2 aparecem em pequenas ilhas isoladas dentro das micrografias, como mostram respectivamente as FIG. 4.8, 4.9 e 4.10.

A fase contínua de Fe puro mostrou um contraste cinza escuro nas micrografias de varredura eletrônica, enquanto que o Cu apresentou contraste cinza médio e as partículas de NbC apresentaram contraste cinza claro. As porosidades são apresentadas em preto. Nos poros infiltrados pelo elemento cobre pode-se notar uma coloração mais clara, permeando a peça em formatos irregulares - espaços que anteriormente encontravam-se vazios

A composição química das regiões indicadas nas FIG. 4.8, 4.9 e 4.10 foi obtida pela técnica de espectroscopia por energia dispersiva - EDS, também conhecida como EDX.

Figura 4.9. Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) de um inserto obtido com a mistura M2, com elementos identificados por EDS.

Figura 4.10. Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) de um inserto obtido com a mistura D2, com elementos identificados por EDS.

Figura 4.11. Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) de um inserto obtido com a mistura M3/2, mostrando um aspecto geral da disposição dos elementos e porosidade da peça em menor ampliação.

Figura 4.12. Micrografia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) de um inserto obtido com a mistura M2, mostrando um aspecto geral da disposição dos elementos e porosidade da peça.

Figura 4.13. MEV de um inserto obtido com a mistura D2, mostrando um aspecto geral da disposição dos elementos e porosidade da peça.

O inserto obtido com a mistura M3/2 e analisado por MEV apresentou os menores poros dentre as três misturas observadas, como pode-se perceber comparando a FIG. 4.11 com as FIG. 4.12 e 4.13. Teve-se o cuidado de usar micrografias com a mesma ampliação nessa etapa do trabalho. Tais imagens também mostram como o elemento infiltrante cobre se apresentou nas diferentes misturas, tendo aparentemente preenchido mais poros na mistura M3/2 do que nas demais.

5 CONCLUSÃO

As diferenças entre valores obtidos nas caracterizações dos insertos foram pequenas para alguns dos testes realizados e mais expressivas em outros. A presença de porosidade menor dos insertos obtidos com a mistura M3/2, quando comparada as outras misturas, e verificada nas imagens de microscopia óptica de varredura eletrônica, pode explicar o motivo pelo qual esta mistura apresentou valores superiores no teste de dureza.

Tal efeito também foi observado nos resultados do ensaio de resistência à compressão radial, onde a mistura M3/2 se mostrou mais resistente que as demais. A mistura D2 apresentou valores próximos aos da mistura M3/2 e superiores aos verificados na mistura M2. Percebe-se que quanto menor a porosidade, maior é o valor da resistência final obtida.

Das análises feitas ao longo do trabalho é claro que a mistura que utiliza pó de aço ferramenta M3/2 leva vantagem em relação às demais misturas testadas. Sua densidade se equivale à dos demais, ela é mais dura e resistente à ruptura radial. O aspecto de dureza superior é vantajoso por garantir uma vida útil mais longa ao inserto após tantos e tanto contatos com a superfície da válvula.

Os insertos produzidos com a liga metálica denominada M3/2 mostraram-se mais vantajosos em relação aos demais por terem apresentado melhor desempenho nos testes de dureza e resistência à compressão radial. Dessa forma tendem a preservar suas dimensões originais por mais tempo durante o uso, podendo prolongar a vida útil das peças e permitindo estanqueidade regular na câmara de combustão dos motores.

Em contrapartida os insertos obtidos com a mistura D2 tiveram medições para valores de dureza menores que as da mistura M3/2. Por se tratar de peças que requerem tratamento de usinagem antes do processo de montagem, a liga D2 tende a agredir menos as ferramentas de corte do que a mistura M3/2, devido a sua dureza inferior em relação a esta última. Como ambas apresentaram valores semelhantes nos ensaios de resistência à compressão radial - quando se considera o desvio padrão da medida - a mistura D2 é uma possível alternativa ao uso de insertos obtidos com a mistura M3/2.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros um estudo mais aprofundado variando-se a temperatura de sinterização. A mistura M2 ficou muito porosa, podendo ser um sinal que a temperatura de sinterização ficou aquém da ideal

REFERÊNCIAS

AMBROZIO FILHO F.; ROSSI J. L.; ARAÚJO E. G., SALGADO L.; VATAVUK J., HERMANN FILHO C.; COLOSIO M. A. **Metalurgia do pó - perspectivas para a indústria automotiva**. SAE Brasil, technical paper series n. 2000-01-3272, p. 1-8. São Paulo, 2000.

AMIM K.E. **Friction in Metal Powders**, The International Journal of Powder Metallurgy, vol. 23, número 2, p. 83, 1987.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES **Estatísticas sobre a produção anual de automóveis - Site da Associação nacional dos fabricantes de veículos automotores**. 2014 Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/tabelas2012.html>>. Acesso em 26 de setembro de 2014.

ASTM C 373-88 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASSOCIATION STANDARD TEST METHODS INTERNATIONAL. **Standard test method for: Water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products**. 1999.

ASTM E 92-82 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASSOCIATION STANDARD TEST METHODS INTERNATIONAL. **Standard test method for: Vicker hardness of metallic materials**. 1982.

BAPTISTA A. L. B. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. in: Revista Escola de Minas, v. 55, número 2, p.103-109, Minas Gerais, 2002.

BLACK S. C.; CHILES, V.; LISSAMAN, A. J. **Principles of engineering manufactures**, 3ed. Arnold, 1996.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó, Técnicas e Produtos**. p. 3 a 25. Édile: São Paulo, 2002.

DELMONTE, J. **Metal / polymer composites**. Van Nostrand Reinhold, p. 1-48. New York, 1990.

EPMA - EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION **Powder metallurgy in numbers**. Disponível no portal da EPMA: <<http://www.epma.com/stats/study09811.htm>> Acesso em 9 de maio de 2011;

FUJIKI A.; AOKI T.; MARUMOTO K.; YOSHIDA M.; TANAKA H. **Mixed powder metallurgy process**. NISSAN MOTOR. US Pat. 2001037842. Nov. 8, 2001.

FURUKAWA, M. **Sinterização de aço inoxidável reforçado com partículas nanométricas dispersas de carbeto de nióbio - NbC**. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, 2007.

GERMAN R. M. **Powder Metallurgy Science**, Princeton. New Jersey: MPIF, 1984.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and systems.** P. 344-382. Lehigh University: New York, 2010

HÖGANÄS, **Técnicas em metalurgia do pó - Publicação da empresa.** Höganäs Brasil, 2008. Disponível. em: <<http://hoganas.com.br/publi/set/2008.htm>> Acesso em outubro de 2011;

HÖGANÄS AB 2007 *in* PALLINI, M. **Mini-curso sobre metalurgia do pó**, módulo 2. Metaldyne, 2009. Disponível em <<http://www.recompo.com.br/upload/MiniCursoM2-Nov2009.pdf>> Acesso em julho de 2013.

IERVOLINO, F. **Aplicações.** In: A Metalurgia do Pó - alternativa econômica com menor impacto ambiental., cap. 3 Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, p. 37 a 52. Metallum Eventos Técnicos: São Paulo, 2009

JANG G. B.; HUR M. D.; KANG S. S. **A study on the development of a substitution process by powder metallurgy in automobile parts.** in: Journal of Materials Processing Technology, 100th ed., p.110-115. New Jersey, 2000

JESUS FILHO, E. S. **Processamento, Usinagem e Desgaste de Ligas Sinterizadas para Aplicações Automotivas.** Tese - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP. São Paulo, 2006.

KUHN, H. A.; LAWLEY, A. **Powder metallurgy processing - New techniques and analyses.** P.2-35. New York, 1978.

LENEL, F.V. Powder Metallurgy - **The Pressind and Sintering Properties of Iron Powder** . in: Principles and Applications of Powder Metallurgy. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, p. 218-248. Califórnia, 1998.

LOBERTO, A.; GENOVA, L. A.; SILVA, M. C. A. **Aspectos gerais da sinterização** In: A Metalurgia do Pó - alternativa econômica com menor impacto ambiental, cap. 7. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, p.209 a 230. Metallum Eventos Técnicos: São Paulo, 2009.

MARCONDES, F. C. **A História do metal duro.** P. 219-222. Sandvik, 1990.

MPFI - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION - Standard 35. **Method for determination of crunch radial strenght.** MPFI Standard 35, 1965

ORLANDIN, J.; CARVALHO, M; PEGORER, R; MAZZA, P **Sinterização.** In: A Metalurgia do Pó - alternativa econômica com menor impacto ambiental, cap. 8. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, p.127 a 154. Metallum Eventos Técnicos: São Paulo, 2009.

PALLINI, M. A. T. **Etapas complementares.** in: A Metalurgia do Pó - alternativa econômica com menor impacto ambiental, cap. 7 Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, p. 233 a 253. Metallum Eventos Técnicos: São Paulo, 2009.

RANDALL, M. G. **Powder metallurgy & particulate materials processing.** P. 71-204. MPIF, 2005

SALGADO, L. **A produção de pós metálicos** - Coletânea ciclo de palestras sobre metalurgia do pó - Universidade de Santa Catarina, faculdade de engenharia de Joinville, 1997.

SALGADO, L.; AMBROZIO FILHO, F.; ROSSI, J. L. **A metalurgia do pó e o setor automotivo**. in: Artigo apresentado no congresso SAE Brasil, 2000.

SANTOS, C. E. L. M. **O processo de metalurgia do pó e seus tratamentos pós sinterização** - Universidade de Santa Catarina, faculdade de engenharia de Joinville. 1997.

SCALON, V. L. **Curso de termodinâmica avançada** - pós graduação em engenharia mecânica FEB/UNESP - Bauru, São Paulo. Versão 1.0/2006. Disponível em <<http://www.feb.unesp.br/scalon/pg/completo.pdf>> Acesso em outubro de 2014.

SCHATT W.; WIETERS, K. **Powder characterization methods**. in: Powder Metallurgy - Processing and Materials, p. 18 - 56. Ed. European Powder Metallurgy Association: Shrewsbury, U.K., 1997.

Site DEMOTOR, 2014. Figura disponível em: <<http://en.demotor.net/>> Acesso em agosto de 2014.

HOWSTUFF, 2014. Figura disponível em: <<http://www.howstuffworks.com/engine1.htm>> Acesso em julho de 2014.

UFRGS, 2014. Figura disponível em <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20041/Melissa/motor_gasolina.gif> Acesso em maio de 2014.

SIMÕES, D. G.; LAZZARI, C. P.; CINTHO, O. M.; CAPOCCHI, J. D. T. **Síntese de carbeto de nióbio por moagem de alta energia**. In: 22º simpósio de iniciação científica da USP - SIICUSP. São Paulo, 2012. Disponível em <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=4348&numeroEdicao=14>>. Acesso em agosto de 2014.

WHITTAKER, D. **Perspectives in powder metallurgy**. in: The International Journal of Powder Metallurgy, vol. 34, nº34, p. 53-62. 1998.