



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CAMPUS MOSSORÓ

RODRIGO DIAS ASSIS SADANHA

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇO RÁPIDO OBTIDO POR
METALURGIA DO PÓ

Mossoró-RN
2018

RODRIGO DIAS ASSIS SALDANHA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇO RÁPIDO POR METARLUGIA
DO PÓ**

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção de aprovação na disciplina Projeto de Conclusão de Curso 2, no Curso de Engenharia Mecânica, na Universidade Federal Rural do Semi-árido.

Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior

Mossoró-RN

2018

RODRIGO DIAS ASSIS SALDANHA

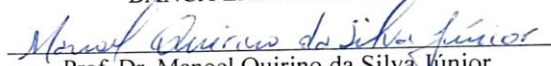
**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇO RÁPIDO POR METARLUGIA
DO PÓ**

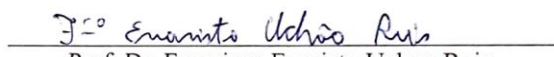
Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção de aprovação na disciplina Projeto de Conclusão de Curso 2, no Curso de Engenharia Mecânica, na Universidade Federal Rural do Semi-árido.

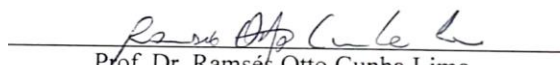
Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior

APROVADA EM: 18 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior
Presidente


Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis
Primeiro Membro


Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima
Segundo Membro

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

SS162 Saldanha, Rodrigo Dias.
o Obtenção e Caracterização de Aço Rápido obtido
por Metalurgia do Pó / Rodrigo Dias Saldanha. -
2018.
33 f. : il.

Orientador: Manoel Quirino da Silva Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

1. Aço Rápido. 2. Metalurgia do Pó. 3.
Caracterização. 4. Sinterização. I. da Silva
Júnior, Manoel Quirino, orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

A Deus por sempre me cobrir com sua graça e misericórdia infindável e me sustentar quando fraco estou.

*A **Silvana Dias Alves da Câmara**, minha mãe, por sempre estar ao meu lado, me dando apoio nas minhas decisões.*

*A **Romildo Saldanha da Câmara Segundo**, meu pai, por ser meu exemplo, amigo e orgulho*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se mostrar presente me apoiando em todos os momentos da vida, iluminando minhas decisões, fortalecendo e orientando durante toda a minha trajetória, todos os dias me protegendo, dando saúde e sabedoria necessária para realização dos meus objetivos.

Aos meus pais, Romildo Saldanha da Câmara Segundo e Silvana Dias Alves da Câmara, simplesmente os melhores pais, que devem ser tomados como exemplo, pelo o apoio, orações, dedicação, paciência, incentivo e toda a preocupação e investimentos junto aos meus estudos e sonhos.

À minha família, pela constante presença e apoio, são a minha base. Cada um de vocês contribuiu para que seja o que sou hoje.

A minha namorada Izabelly França que me deu cada puxão de orelha importante, sempre torcendo, incentivando, me escutando, sendo minha melhor amiga e estando sempre ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos Josué Oliveira, Emerson Carvalho, Hermesson Medeiros, Thelles Soares, Thalles Silveira.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Júnior, pela compreensão, paciência e cobranças que só vieram a acrescentar este trabalho, por ser um referencial de profissional e professor para mim.

Aos meus amigos de caminhada acadêmica Agnus Fontes, Juarez Neto, Nyckson Patrick, Rafael Dias, Vítor Dionizio, William Lopes, Ubiracui Junior, Paulo Ricardo, Antônio Segundo, Samuel Menezes, Larissa “Semele” Pontes, Paula “DM” Caminha, Jakson “Phragos” Gomes, Marcos Paulo e Francielle Cristine pela amizade e pelas conquistas durante esta jornada, período que somou bastante experiência e aprendizado.

“Deves aprender as regras do jogo. E depois
deves jogar melhor que todo mundo.”
(Albert Einstein)

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo obter um aço rápido, através da metalurgia do pó, sem a presença de Cobalto (Co), utilizando a composição convencional do mesmo, que é encontrado na norma, variando pressão de compactação e temperatura de sinterização em 9 diferentes amostras, analisando as suas características microestruturais através de microscopia ótica e propriedades mecânicas de microdureza. As amostras foram fabricadas a partir da união de pós dos seguintes elementos: Ferro (Fe), Molibdênio (Mo), Cromo (Cr), Carbono (C) e Nióbio (Nb) para o Aço Rápido M10, com substituição do Vanádio. As amostras apresentaram um fraco coalescimento dos grãos a medida que se aumentava a temperatura, aumentando a porosidade do mesmo e um baixo valor de microdureza em comparação com o mesmo aço produzido por processo convencional.

Palavras-chave: Aço rápido. Metalurgia do pó. Caracterização. Sinterização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedade físicas e mecânicas do Aço Rápido AISI M10	14
Figura 2 - Comparação entre dureza e tenacidade em materiais para ferramenta de corte.....	15
Figura 3 - Principais características dos aços rápidos e suas relações com os elementos de ligas presentes.	17
Figura 4 - Fluxograma das etapas do processo convencional de obtenção de aço rápido	17
Figura 5 - Representação esquemática da operação de compactação.....	20
Figura 6 - Representação das densidades do pó solto e do compactado verde	20
Figura 7 - Resistência mecânica da metalurgia do pó comparada com outros processos de fabricação	22
Figura 8 – Dimensões da matriz de aço 4340, vista e corte	24
Figura 9 - Grupo de amostras antes da sinterização, dimensões em milímetros.....	25
Figura 10 – Microestrutura das amostras compactadas a 382,2 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C	27
Figura 11 - Microestrutura das amostras compactadas a 509,6 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C	28
Figura 12 - Microestrutura das amostras compactadas a 637 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C	29
Figura 13 - Gráfico Microdureza (HV) x Pressão de Compactação (MPa).....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagens de massa e gramatura a partir de 50g de pó	23
Tabela 2 - Pressões e temperaturas correspondentes a cada amostra	25
Tabela 3 - Valores médios de microdureza (HV) e desvio padrão de cada amostra	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral.....	13
1.2	Objetivos Específicos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	AÇOS RÁPIDOS	14
2.2	METALURGIA DO PÓ	18
2.2.1	Características que devem ser controladas	18
2.2.2	Produção dos pós	18
2.2.3	Mistura.....	19
2.2.4	Compactação	19
2.2.5	Sinterização.....	21
2.2.6	Aços rápidos por Metalurgia do Pó	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5	CONCLUSÕES	31
6	SUGESTÕES.....	32
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo foi percebido a dificuldade de produzir peças e elementos para máquinas em geral, para isso foi desenvolvido o processo de usinagem que permite obter peças com dimensionamento preciso e superfície extremamente regular, melhorando a precisão e eficiência da mesma.

O primeiro grande impacto significativo causado nos materiais para ferramenta de corte aconteceu em meados de 1899, quando Taylor e White desenvolveram o aço rápido (HSS). O aço rápido revolucionou a usinagem da época dando um aumento considerável na produtividade. As velocidades de corte puderam ser ampliadas de 3 a 5 m/min com ferramentas de aço carbono para 30 a 35 m/min com os aços rápidos.

Uma das formas de obter ferramentas de corte para usinagem é pela mistura e compactação de pós metálicos, denominada de metalurgia do pó, processo este que se desenvolveu mais rapidamente após a Segunda Guerra Mundial para atender a grande demanda no florescente setor automobilístico.

As principais etapas do processo são: obtenção dos pós, sua mistura, a compressão da mistura resultante com o emprego de matrizes e a sinterização (operação de aquecimento, realizada em condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera) através do aquecimento da compactação resultante de modo a produzir uma ligação entre as partículas e conferir resistência mecânica ao material compactado. As partículas são unidas em uma peça única, coesa, similar ao que seria obtido pela fundição dos mesmos materiais juntos.

A introdução dessa técnica para produção de aços rápidos surgiu na busca por melhores propriedades utilizando os mesmos materiais, como ligas de tungstênio, cromo, molibdênio, vanádio e cobalto que apresentam baixa solubilidade. Tendo a liga de carboneto de tungstênio (wc) com cobalto (co) uma dificuldade de obtenção pois este último elemento é encontrado em regiões de conflito e por isso há uma alta variação de preço.

A motivação desse trabalho é obter uma liga de aço rápido, através de metalurgia do pó, utilizando a composição clássica, ou seja, a mesma composição presente na norma, já que para o processo de metalurgia do pó, comumente se compacta diretamente os carbonetos. Uma vez obtida a liga por esse método, caracteriza-la por microscopia ótica e ensaio de microdureza.

1.1 OBJETIVO GERAL

- Obter um aço rápido, através da metalurgia do pó, sem a presença de Cobalto, utilizando a composição clássica do mesmo, ou seja, utilizando os elementos presentes em sua composição normativa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Escolha da composição para fabricação do aço rápido em observância a proposta de não haver a presença de cobalto e junto a NBR 116-1.
- Realizar pesagem, através de uma balança de precisão, e posteriormente misturar os pós a fim de obter uma homogeneização;
- Realizar compactação dos pós em 3 pressões diferentes com o auxílio de uma prensa hidráulica manual;
- Realizar sinterização em 3 temperaturas distintas, em forno tipo mufla;
- Caracterizar por microscopia óptica;
- Medir e analisar microdureza.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AÇOS RÁPIDOS

Os aços rápidos são utilizados na fabricação de ferramentas de usinagem normalmente quando se deseja pesados avanços e grandes velocidades de corte, produzindo materiais de média e alta resistência, tudo isso se comparados com outros aços (SILVA, 2010). Esse tipo de aço recebeu a nomenclatura de rápido devido sua capacidade de reter boa dureza, algo em torno de 60-70 HRC, como observa-se pela Figura 1 do aço rápido AISI M10. Além de elevada dureza, outra importante característica destes aços é a capacidade de manter essa dureza quando submetidos a temperaturas de até 600°C.

Figura 1- Propriedade físicas e mecânicas do Aço Rápido AISI M10

Physical Properties	Metric	English	Comments
Specific Gravity	7.89 g/cc	7.89 g/cc	
Density	7.89 g/cc	0.285 lb/in³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell C 	40	40	Oil Quenched from 1218°C; 566°C Double Temper Temperature
	@Temperature 650 °C	@Temperature 1200 °F	
	60.5	60.5	Oil Quenched from 1218°C; 566°C Double Temper Temperature
	@Temperature 316 °C	@Temperature 601 °F	
	65	65	Oil Quenched from 1218°C; 566°C Double Temper Temperature
	@Temperature 22.0 °C	@Temperature 71.6 °F	
Modulus of Elasticity	207 GPa	30000 ksi	
Machinability	50 - 55 %	50 - 55 %	1% Carbon Steel
Izod Impact Unnotched	47.5 J	35.0 ft-lb	Oil Quenched at 1218°C; 482°C Temper Temperature
	58.3 J	43.0 ft-lb	Oil Quenched at 1218°C; 566°C Temper Temperature
	59.7 J	44.0 ft-lb	Oil Quenched at 1218°C; 622°C Temper Temperature
	73.2 J	54.0 ft-lb	Oil Quenched at 1163°C; 482°C
	88.1 J	65.0 ft-lb	Oil Quenched at 1163°C; 622°C
	107 J	79.0 ft-lb	Oil Quenched at 1163°C; 594°C

Fonte: Latrobe TNW¹, 2018

Demais características importantes dos aços rápidos são a sua alta resistência ao desgaste abrasivo, que retarda o desgaste do gume da ferramenta sob severas condições de trabalho, tenacidade suficiente para evitar falha por fratura e boa estabilidade dimensional.

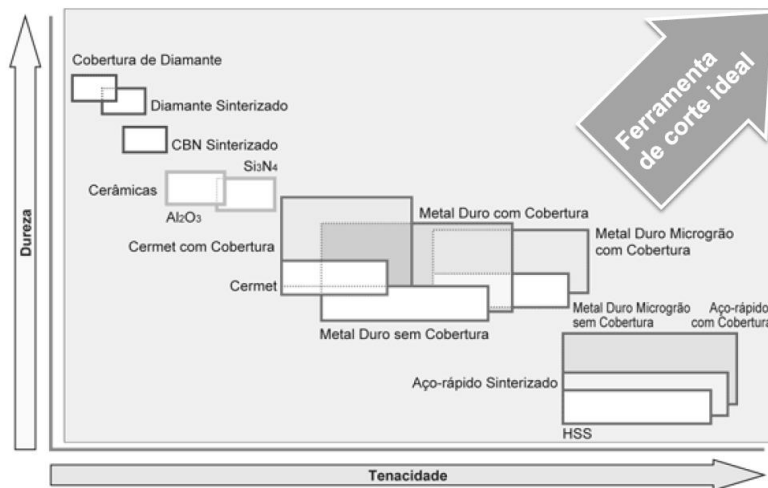
É possível reparar pela Figura 2 uma relação entre dureza e tenacidade de diferentes materiais de ferramenta de corte.

¹ Disponível em:
<<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=126c4f4485964351b9ebfd4188a98856&ckck=1>>
Acesso em: 15 de Abril de 2018

Comentado [Q1]: Essa Figura deve vir no referencial teórico

Comentado [U2R1]:

Figura 2 - Comparação entre dureza e tenacidade em materiais para ferramenta de corte



Fonte: Mitsubishi Materials², 2018

Os aços rápidos apresentam uma boa variedade de composição química, mas suas características, segundo Silva (SILVA, 2010), são similares pois todos contêm carbono suficiente para combinar-se com os elementos de liga, são austenitizados para têmpera a aproximadamente 50-75°C abaixo da temperatura de fusão desse material, temperam completamente, apresentam endurecimento secundário no revenimento entre 510 °C e 590 °C e atingem praticamente a dureza máxima quando temperados em ar parado.

A *American Iron and Steel Institute* (AISI) divide em dois grandes grupos os aços rápidos: os aços ao tungstênio (W) identificados pela letra “T”, e os aços ao molibdênio (Mo), identificados pela letra “M”. As duas séries são equivalentes em desempenho; contudo, os aços rápidos da série M mostram-se mais vantajosos pois, além de terem tenacidade um pouco maior que os aços da série T equivalentes, quando temperados para obter a mesma dureza, apresentam menor custo inicial. Isto se deve, pois, o molibdênio (que nesta série substitui parcialmente o tungstênio) apresenta peso atômico igual à praticamente metade do peso atômico do tungstênio; desta forma, em peso, 1% de molibdênio equivale a aproximadamente 1,8% de tungstênio.

² Disponível em:

<http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html> Acesso em 01/06/2017

Assim, os mais comuns e principais elementos que formam as ligas de aço rápido são (CHIAVERINI, 1979):

- Carbono: concentrações variam de 0,7% a 1,6% sendo a dureza proporcional quantidade deste elemento. Maior teor de carbono também leva à maior retenção de austenita na têmpera, exigindo maiores tempos e temperaturas de revenido;
- Tungstênio: teores de até 20%, responsável pela elevada resistência ao desgaste;
- Molibdênio: ele é substituto parcial do tungstênio, tem um menor ponto de fusão em relação ao W (aços ao Mo são temperados em temperaturas inferiores) e possui durezas a quente inferiores também;
- Vanádio: possui concentrações que variam de 1% a 5%, formam o carboneto mais duro encontrado no HSS. Deve-se levar em conta também que aumentar o teor de Vanádio implica em elevar o teor de carbono, caso contrário o vanádio promove a ferritização do aço diminuindo em muito a dureza deste. Aços rápidos com elevado teor deste elemento possuem maior resistência ao desgaste.
- Cromo: teores de aproximadamente 4%, é responsável pela elevada temperabilidade dos aços e diminui a oxidação do aço durante o tratamento térmico;
- Cobalto: aumenta a dureza a quente e baixa a difusão de elementos de liga, inibindo com isso a coalescência de carbonetos secundários, também produzem grandes quantidades de austenita retida na têmpera, o que resulta em maiores endurecimentos secundários no revenido;
- Outros: o enxofre por exemplo, em teores de 0,05% a 0,2% se adicionado, melhora a usinabilidade dos aços rápidos incluindo o acabamento superficial, mas a tenacidade é prejudicada. O nióbio pode substituir o vanádio. Outros elementos também podem ser encontrados como o boro.

Na Figura 3 pode-se conferir a relação que os elementos de liga têm com determinadas características desejadas nos aços rápidos.

Figura 3 - Principais características dos aços rápidos e suas relações com os elementos de ligas presentes.

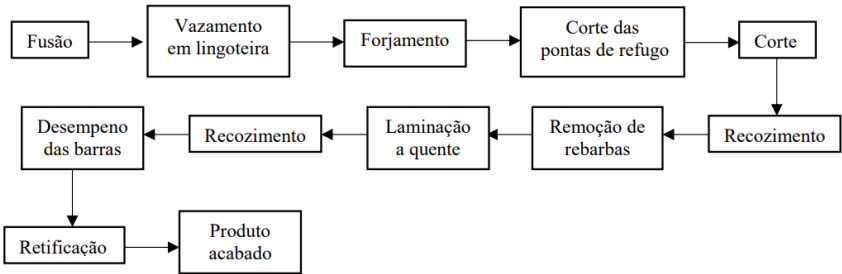
Características	Elementos de liga
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste abrasivo	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	B, V, Mo, Cr, Mn, Si, Ni
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Aumento da tenacidade pelo refino do grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Fonte: Ferraresi, 1997

Araujo Filho (2006) relata que os aços rápidos são formados por uma fase de carbonetos, entre 20 a 30%, dispersos em uma matriz rica em elementos formadores de carbonetos (W, V, Mo, Cr) e uma quantidade suficiente de carbono de maneira a satisfazer os requisitos estequiométricos dos carbonetos e promover um endurecimento da matriz.

Os aços rápidos podem ser obtidos por uma rota convencional, ou seja, por fusão dos materiais seguida de vazamento do lingote, feita uma conformação mecânica, tratamentos térmicos, que de acordo com Silva (2010) são pré-aquecimento, forjamento, recozimento, têmpera e revenimento, e por último é feita a usinagem (retificação). O processo convencional de obtenção pode ser observado pelo fluxograma na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma das etapas do processo convencional de obtenção de aço rápido



Fonte: Autoria Própria, 2018

Outro método que tem ganhado bastante espaço na obtenção de aços rápidos é por meio da metalurgia do pó (PM, do inglês Powder Metallurgy). Usar metalurgia do pó para fabricação de aço rápido começou por buscar as melhores propriedades utilizando as mesmas composições clássicas (SILVA, 2010).

2.2 METALURGIA DO PÓ

Chiaverini (2001) define a metalurgia do pó como um processo de fabricação que se utiliza de pós metálicos e não-metálicos como matéria-prima, sem a presença, total ou parcial, de fase líquida durante todo o processo, obtendo, ao final, componentes com características físicas e estruturais que seriam impossíveis de se conseguir por outro processo metalúrgico.

A metalurgia do pó é um processo em que a economia de material é levada ao extremo, com mínimas perdas de matéria-prima (as perdas da rota convencional podem chegar a 50%). Alguns dos motivos que tornam a metalurgia do pó uma fonte produtora de peças são o controle exato da composição química desejada do produto final, a redução ou eliminação das operações de usinagem, bom acabamento de superfície, a pureza dos produtos obtidos e a facilidade de automação do processo produtivo em praticamente todos os ramos da indústria, como os setores automobilística e aeroespacial por exemplo (MORO; AURAS, 2007).

2.2.1 Características que devem ser controladas

Algumas características dos pós metálicos e não metálicos utilizados devem ser controladas, pois podem influenciar no comportamento do pó durante seu processamento como também na qualidade final do produto sinterizado (MORO; AURAS, 2007). Entre as características podem ser citadas (CHIAVERINI, 2001): tamanho da partícula e distribuição de tamanho; forma da partícula; porosidade das partículas; superfície específica; densidade aparente (g/cm^3), compressibilidade; composição química e pureza e resistência verde.

2.2.2 Produção dos pós

Chiaverini (2001) explica que existem várias maneiras de obtenção do pó, sendo que a escolha de qual método utilizar, baseia-se nas características que se deseja obter em função da aplicação do pó. Dentre elas, as principais são:

- Processo de eletrólise;
- Métodos Mecânicos (quebra e moagem);
- Cold-Stream;
- Redução Química;
- Atomização

Com a grande demanda de novos tipos de pó para aplicações mais refinadas, é inevitável o surgimento de novos processos de atomização. Entre esses novos processos podemos citar o eletrodo rotativo, onde o metal é derretido por arco elétrico e centrifugado em torno do eixo longitudinal; atomização a vácuo, que provoca a pulverização do metal que está fundido; disco rotativo, que consiste em um choque entre uma corrente de metal líquido e um disco rotativo em alta velocidade; e o de ultrarrápida solidificação, onde o metal líquido é resfriado a uma grande taxa de extração de calor (10 °C/s ou mais).

2.2.3 Mistura

Dispondo-se de pós metálicos devidamente caracterizados, a primeira operação para se obter componentes pelo processo de Metalurgia do Pó é a mistura. Na mistura, procura-se assegurar uniformidade e distribuição em tamanhos de partículas mais adequadas para a etapa seguinte que é a compactação (MIRANDA, 2004).

A técnica utilizada para mistura de pós metálicos e não metálicos é denominada de Moagem de Alta Energia, que consiste em sucessivos processos de deformação, soldagem e fratura e que acontecem sempre que um determinado número de partículas de pós se situam entre duas bolas durante a colisão, para isso utiliza-se de moinhos de bolas ou misturadores de pás. (KALPAKJIAN, 2000).

2.2.4 Compactação

Considerada por muitos autores a primeira das operações de consolidação, Chiaverini (2001) relata que essa etapa tem como objetivos principais: dar a forma final do pó (levando em conta as possíveis alterações dimensionais), conferir resistência mecânica para posterior manejo e promover o contato necessário das partículas para uma eficiente sinterização. Deve-se tomar cuidado ao manusear o compactado verde (nome dado a peça compactada, mas ainda não sinterizada) pois ela é muito frágil e sua incorreta manipulação implicará no esfrelamento da peça.

A compactação em si é feita por uma aplicação de pressão, onde o tipo mais tradicional é por compressão em matrizes rígidas. Outro processo que está ficando bastante recorrente é o de compressão isostática (a frio ou a quente). A compactação utilizada do presente trabalho será compactação em matrizes rígidas, descrita asseguir.

2.2.4.1 Compactação em matrizes rígidas

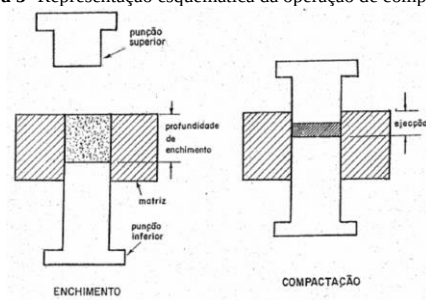
Neste tipo de compactação, uma quantidade de pó predeterminada é colocada dentro de uma concavidade em uma matriz montada em uma prensa que são empregadas do tipo mecânico

ou hidráulico. A compactação ocorre a temperatura ambiente e se dá pela locomoção dos punções inferior e superior da prensa simultaneamente (MORO; AURAS, 2007).

Iervolino (2013) fala que por esse método aplicar apenas pressão uniaxial, é o mais utilizado em larga escala, pois possui um baixo custo aliado a alta precisão dimensional. A densificação por compactação simples pode chegar a 92% da densidade teórica do material, ou até 95% quando são utilizados processos especiais, tais como a compactação a morno ou dupla compactação e dupla sinterização.

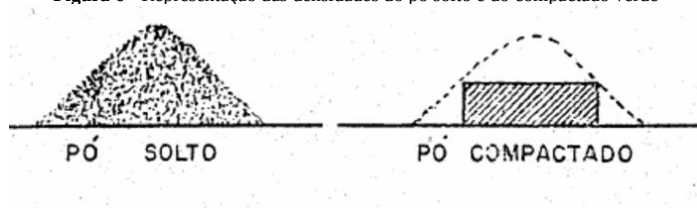
Chiaverini (2001) aponta a capacidade da prensa (em toneladas) e o curso (representado pela profundidade de enchimento) como dados relevantes na seleção de uma prensa. A capacidade de uma prensa é expressa pela função entre a pressão de compactação e a área projetada da peça a ser produzida. Na Figura 6, pode-se observar uma operação simples de compactação e na Figura 7 a densidade aparente do pó “solto” e sua densidade como compactado verde.

Figura 5- Representação esquemática da operação de compactação



Fonte: Chiaverini, 2001

Figura 6 - Representação das densidades do pó solto e do compactado verde



Fonte: Chiaverini, 2001

A capacidade de produção de uma prensa mecânica, do tipo rotativa (possui várias matrizes montadas em uma mesa rotativa) por exemplo pode chegar a 1000 peças por minuto,

com capacidade que variam de 3 a 900 toneladas. Já as prensas hidráulicas têm capacidade de até cerca de 2800 toneladas, tornando-as mais versáteis e chegam a produzir até 15 peças por minuto (CHIAVERINI, 2001).

Moro (2007) alerta que determinadas peças são inviáveis pois podem ocorrer a formação de zonas neutras, região onde as partículas sofreram menos forças de compactação, obtendo uma peça de caráter heterogêneo que possuem propriedades distintas do restante da peça final. Por essa razão o projeto da peça, bem como a definição da pressão de compactação são importantes para não acarretar tal problema.

2.2.5 Sinterização

A sinterização é a etapa final do ciclo de consolidação dos pós metálicos, que consiste no aquecimento dos compactados verdes a altas temperaturas, entretanto deve ser abaixo da temperatura de fusão do metal ou principal constituinte da liga metálica selecionada, mantendo o tempo, a temperatura e o meio ambiente sempre em condições controladas. O resultado disso é a obtenção da peça final com a densidade, dureza e resistência mecânica desejadas devido a união entre as partículas do compactado (CHIAVERINI, 2001).

São utilizados fornos contínuos, tipo esteira, divididos em zona de pré-aquecimento, zona de manutenção da temperatura e zona de resfriamento (MORO; AURAS, 2007). Há também os fornos intermitentes, tipos caixa, sino, mufla. Ocorrem diversas reações químicas e físicas entre as partículas durante o processo de sinterização, entre eles está a redução ou total eliminação da porosidade existente no compactado, se levarmos em conta a peça final com o compactado verde, por exemplo, há contração de cerca de 40% do volume.

O tempo de aquecimento, segundo Moro (2007), aperfeiçoa o mecanismo de coesão do compactado para uma determinada temperatura. Temperaturas próximas às de fusão do metal principal, geram obtenção da força coesiva máxima em um curto espaço de tempo, geralmente em segundos.

Para evitar fenômenos indesejados durante a sinterização, emprega-se as atmosferas protetoras, cujas funções são: prevenir ou minimizar reações químicas entre o compactado verde e os gases da atmosfera, evitar a oxidação, remover impurezas superficiais e internas existentes e fornecer um ou mais elementos químicos para se ligarem com o compactado (CHIAVERINI, 2001).

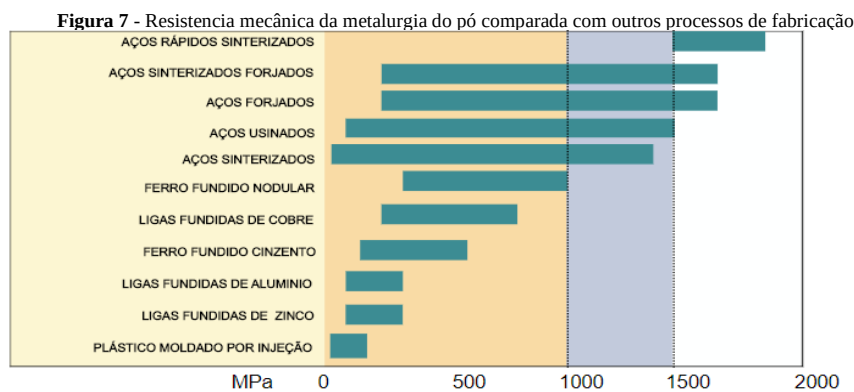
Moro (2007) também comenta que os fenômenos que ocorrem na sinterização podem ser resumidos em ligação inicial entre partículas, crescimento da ligação, fechamento dos canais

que interligam os poros, arredondamento dos poros, densificação ou contração dos poros e eventual crescimentos dos poros.

2.2.6 Aços rápidos por Metalurgia do Pó

As ferramentas de aço rápido fabricadas por metalurgia do pó (HSS-PM) dependem da complexidade da forma desejada porque o processo necessita de uma forma negativa da ferramenta que se pretende produzir, para isso se utiliza de matrizes para compactação do pó que deve possuir tal geometria (MACHADO, 2011).

Para fins comparativos, os aços rápidos produzidos por metalurgia do pó apresentam uma fração volumétrica de 90% de carbonetos duros, enquanto ao utilizar a rota convencional há uma fração volumétrica de apenas 25% desses carbeto, o que confere um aumento de resistência como pode ser observado na Figura 5, além de dureza, tenacidade e, consequentemente, uma melhor performance aos HSS-PM.



Fonte: Grupo Setorial em Metalurgia do Pó³, 2018

Soares (1993) cita que a temperatura convencional de sinterização dos aços rápidos está entre 1250°C a 1350°C para que se alcance a máxima densidade. Tendo os fornos industriais convencionais uma temperatura máxima de 1150°C, torna-se um problema se não conseguir abaixar a temperatura de sinterização padronizada.

Soares (1993) fala que é possível baixar essa temperatura média de sinterização em aproximadamente 100°C, para isso, deve adicionar a mistura a liga Cobre-Fósforo combinado com adição de grafite, pois a liga cobre-fósforo promove a sinterização da fase líquida, enquanto que a adição de grafite baixa a temperatura solidus.

³ Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1739722/>> Acesso em 15/04/2018

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto parte da necessidade de atender o problema proposto, a obtenção de um aço rápido pela metalurgia do pó, utilizando a composição normativa do mesmo aço fabricado por outro processo convencional. Este trabalho apresenta o processo de obtenção de um aço rápido, utilizando pressões de compactação diferentes, bem como temperaturas diferentes, analisando os resultados obtidos de cada amostra e posteriormente comparando com o mesmo tipo de aço fabricado por processo convencional.

Após feita a pesquisa em norma, decidiu utilizar o Aço Rápido AISI M10, visto que em sua composição não apresenta o elemento Cobalto (Co), atendendo assim uma das necessidades primárias do projeto.

Para fabricação do aço, foram obtidos em forma de pó, os elementos Ferro, Cromo, Molibdênio, Carbono (em forma de grafite) e, por não haver disponível o elemento Vanádio, foi substituído pelo Nióbio, devido conferirem propriedades físicas semelhantes, todos eles cedidos pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.

Com base na norma NBR 116-1, as porcentagens de cada elemento, bem como a suas massas proporcionais a 50g, podem ser verificadas na Tabela 1, sendo o elemento Fe o balanço.

Tabela 1 - Porcentagens de massa e gramatura a partir de 50g de pó

Elementos	Porcentagens	Massa (g)
Ferro	85,86%	42,82
Carbono	0,84%	0,46
Molibdênio	7,75%	3,89
Cromo	3,75%	1,92
Nióbio	1,80%	0,9

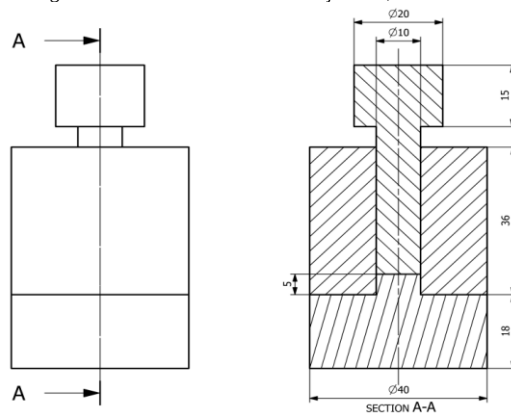
Fonte: Autoria Própria, 2018

Os elementos foram separados na proporção conforme Tabela 1, com o auxílio de uma balança de precisão modelo FA22046 da marca Bioscale. Feita a correta pesagem de todo o pó, o mesmo foi misturado durante 4 horas contínuas em um recipiente plástico a uma rotação de 30 rpm com auxílio de um torno mecânico da marca Nardini, modelo Nodus 220.

Feito esse procedimento, o material foi novamente separado com o auxílio da balança de precisão em 9 amostras de 2 g cada. Em seguida, as amostras foram levadas para serem compactadas em uma prensa hidráulica manual da marca Marcon, à uma taxa de compressão

de 0,5 Ton/10 segundos, até atingir a pressão desejada, em uma matriz de aço 4340, usinada e temperada nos laboratórios da UFERSA, com suas dimensões, em milímetros, observadas na Figura 8, para que as amostras ficassem com a forma e dimensões pretendidas.

Figura 8 – Dimensões da matriz de aço 4340, vista e corte

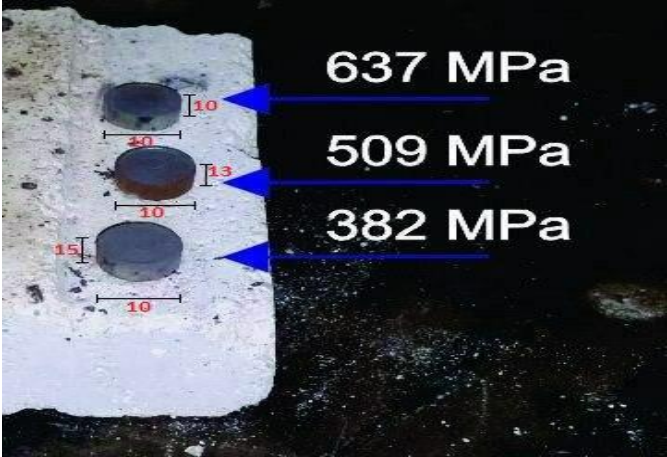


Fonte: Autoria Própria, 2018

As amostras foram distribuídas de modo que 3 delas fossem compactadas com pressão de 382,2 MPa (3 toneladas), outro 3 com pressão de 509,6 MPa (4 toneladas) e o último 3 com pressão de compactação de 637 MPa (5 toneladas).

Com os compactados verdes produzidos, foram separadas 1 amostra de cada tipo para que fossem sinterizadas em 3 temperaturas diferentes, formando grupos com 3 amostras cada, dispostos conforme observado na Figura 9. Após distribuídas as amostras, os grupos foram sinterizados nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C em forno elétrico tipo Mufla da empresa GP Científica, com capacidade de até 1200°C, por um período de 2 horas e resfriamento lento, a taxa de 73°C/h, dentro do próprio forno.

Figura 9 - Grupo de amostras antes da sinterização, dimensões em milímetros



Fonte: Autoria Própria, 2018

A Tabela 2 mostra de forma concisa as condições de compactação e sinterização que cada amostra foi submetida.

Tabela 2 - Pressões e temperaturas correspondentes a cada amostra

Tipo	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)
Amostra 1	382,2	900
Amostra 2	382,2	1000
Amostra 3	382,2	1100
Amostra 4	509,6	900
Amostra 5	509,6	1000
Amostra 6	509,6	1100
Amostra 7	637,0	900
Amostra 8	637,0	1000
Amostra 9	637,0	1100

Fonte: Autoria Própria

Posteriormente foram feitas análises de microscopia ótica e ensaio de microdureza a fim de caracterizar o material e depois compara-lo com o aço rápido forjado.

Para que se fosse realizada a microscopia ótica, antes precisou embutir as amostras em resina de poliéster, para que se tenha um melhor manuseio das mesmas, sendo possível ter um

melhor lixamento e consecutivo polimento. Ambos foram realizados em uma lixadeira/politriz Arapol 2V-PU da Arotec, seguindo a sequência de lixas de acordo com sua granulometria: 180, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200, no polimento foi utilizado alumina de 1 μ m. Após essa etapa, as amostras foram levadas, sem ataque químico, ao microscópio óptico da marca Olympus, modelo GX51, onde foram feitas fotografias das suas microestruturas com uma câmera digital interligada ao microscópio e ajuda do Analysis GETIT®, *software* próprio para essa operação.

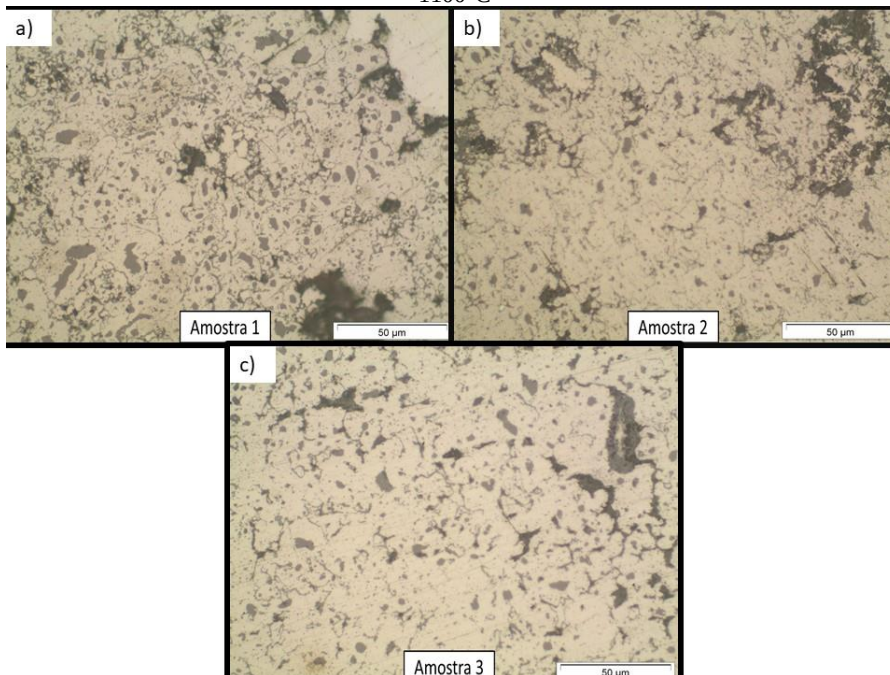
O ensaio de microdureza foi efetuado no microdurômetro da Shimadzu, modelo HMV-2. Em observância a norma ASTM E384, a qual rege a cerca dos ensaios dessa natureza, foram feitas 10 medições com carga de 490 mN no tempo de 10 segundos, obtendo os resultados na escala Hardness Vickers – HV. Os valores colhidos foram tratados no *software* Microsoft Office Excel® a fim de obter as médias e desvios-padrão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A microscopia óptica foi realizada com o intuito de se obter fotografias das microestruturas das amostras e foram realizadas em um aumento de 500x. Percebe-se por elas a presença de porosidade, que é típica deste processo e é determinada por diversos fatores, por exemplo os que foram utilizados como variáveis neste trabalho: a pressão de compactação e a temperatura de sinterização.

As Figuras 10, 11, e 12 mostram as amostras divididas por grupos de 3 cada, separadas pela fator da pressão de compactação em ordem crescente.

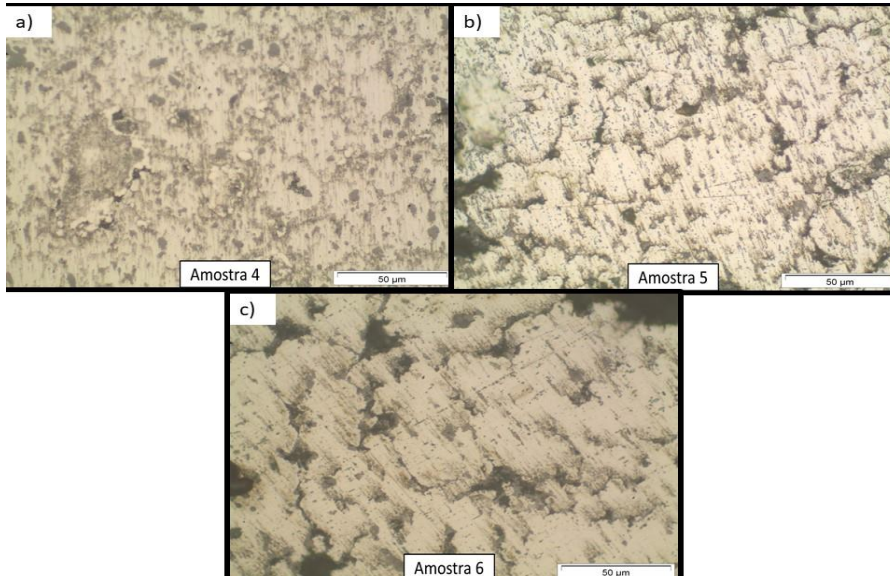
Figura 10 – Microestrutura das amostras compactadas a 382,2 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



Fonte: Autoria Própria, 2018

Pelas micrografias presentes na Figura 10, observa-se um bom coalescimento dos grãos e diminuição da porosidade em função da temperatura de sinterização, apresentando maior uniformidade na distribuição dos grãos a medida que a temperatura aumenta.

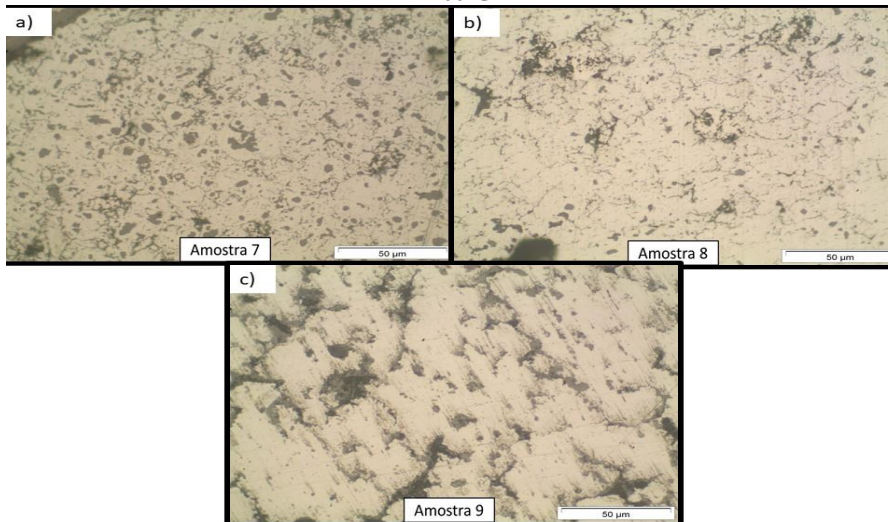
Figura 11- Microestrutura das amostras compactadas a 509,6 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



Fonte: Autoria Própria, 2018

Por estas micrografias é possível perceber que houve uma piora no nível de porosidade a medida que a temperatura de sinterização aumentava. Essas amostras apresentaram, microestruturalmente, uma quantidade superior de defeitos, observados nas partes mais escuras. Esses defeitos possivelmente são causados pela aplicação de temperaturas que não estão na faixa convencional de sinterização e pelo não controle da atmosfera durante a sinterização das mesmas.

Figura 12 - Microestrutura das amostras compactadas a 637 MPa. a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100°C



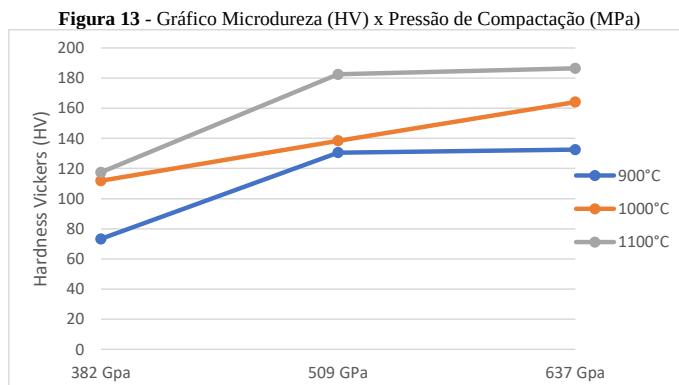
Fonte: Autoria Própria, 2018

Observando as imagens é possível ver que as amostras 7, 8 e 9 apresentam também um aumento bastante significativo da porosidade a medida que a temperatura aumenta, indicando mais uma vez uma fraca coalescência dos grãos em virtude da temperatura de sinterização.

Na tabela 3, observa-se os valores médios de microdureza e seu respectivo desvio padrão e a Figura 16 vê-se um gráfico que sintetiza os dados da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios de microdureza (HV) e desvio padrão de cada amostra		
Tipo	Microdureza (HV)	Desvio Padrão
Amostra 1	73,31	8,28
Amostra 2	111,87	6,62
Amostra 3	117,5	13,03
Amostra 4	130,6	10,80
Amostra 5	138,4	12,74
Amostra 6	182,5	11,16
Amostra 7	132,55	3,93
Amostra 8	164,1	9,64
Amostra 9	186,5	12,86

Fonte: Autoria Própria, 2018



Fonte: Autoria Própria, 2018

Pela análise da tabela e do gráfico é possível perceber que houve um aumento na microdureza das amostras na medida que se aumentava a pressão de compactação e a temperatura de sinterização, mas ao analisar esses resultados e vendo novamente a Figura 1, que mostra o valor de dureza para o AISI M10, e fazer a conversão de HRC para HV, deve-se perceber que os valores obtidos foram muito baixos em relação aos aproximadamente 860 HV, valor de dureza deste aço a temperatura ambiente (22°C). Também foram muito abaixo em relação a faixa de 740 – 980 HV, já devidamente convertido, que Silva (2010) apresenta para os aços rápidos.

O fator determinante para que esses resultados dessem muito baixos foi a temperatura de sinterização. Como Soares (1993) falou, a temperatura ao qual os aços rápidos devem ser submetidos para uma sinterização, deve estar na faixa de 1250 °C a 1350°C, pois segundo ele, abaixo dela, os carbonetos perdem dureza rapidamente.

5 CONCLUSÕES

A realização desse trabalho possibilitou a obtenção de amostras de aços por metalurgia do pó e a realização dos testes para que se caracterizasse o mesmo.

Com base em todos os dados obtidos experimentalmente, pode-se chegar a conclusão, pelas micrografias, que as amostras produzidas possuem um aumento na porosidade em função da sua temperatura de sinterização, pois os grãos não se ligaram tão bem.

As informações dos ensaios de microdureza apontam uma pequena influencia que a temperatura e pressão de compactação exercem no valor da dureza final, mas como não se utilizou da temperatura convencional de sinterização, os grãos não coalesceram tão bem, resultando nos valores baixos que foram apresentados.

6 SUGESTÕES

Como sugestão para projetos futuros que trabalhem com a sinterização do Aço Rápido, sugere-se:

- a) Utilizar a temperatura convencional de sinterização, ou;
- b) Adicionar a mistura, a liga de cobre-fósforo com adição de grafita, a fim de baixar a temperatura de sinterização, ou;
- c) Realizar tratamento térmico de têmpera para aumento da dureza.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E384 - 17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, Pensilvânia, Eua, 2017.

ARAUJO FILHO, Oscar Olímpio de. **Estudo comparativo de aços rápidos AISI M3:2 produzindo por diferentes processos de fabricação**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 116-1: Aços-rápido - Parte 1: Classificação, designação e composição química**. Rio de Janeiro - RJ, 2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 4 ed. São Paulo: ABM, 1979

CHIAVERINI, Vincente. **Metalurgia do Pó**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. 325 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 1997

IERVOLINO, F. **Compactação de Pó Metálico: De que Maneira o Pó Pode Ser Conformado?**. Disponível em: <http://www.metalurgiadopo.com.br/Downloads/2013-03-Revista_IH-Compactacao.pdf> Acesso em 01 de Junho de 2017

KALPAKJIAN, S., **Manufacturing Engineering & Technology**, 4th ed, Addison Wesley, 2000.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p

MIRANDA, F. **Técnicas da Metalurgia do Pó – Tecnologia dos Sinterizados – Escola SENAI Nadir Dias Figueiredo – 1ª edição**, 2004

MORO, Noberto; **AURAS**, André Paegles. **Metalurgia do Pó e o Futuro da Indústria**. Florianópolis: Nobertocefetcs, 2007. 27 slides, color.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; **MEI**, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

SOARES, S. R. da S. **Desenvolvimento de ligas de Aço Rápido pelo processo de Metalurgia do pó**. 1993. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.