

ABNT MATRIZ DE COMPACTAÇÃO EM AÇO D6 PARA OBTENÇÃO DE PRÉ-FORMA SINTERFORJADA EM AÇO 1045

O processo de sinterforjamento constitui-se em uma boa solução para a produção de componentes automotivos, demonstrada na aplicação de fabricação de cruzetas.

Por Márcio José Torres de Paula | Foto Divulgação

A indústria de forjamento de metais porosos tem demonstrado um grande crescimento a nível nacional e mundial, à medida que ocorre um aprimoramento dos métodos de produção e um melhor aproveitamento das vantagens que a metalurgia do pó (MP) oferece. É uma tecnologia moderna e em franca expansão para produzir peças com bom acabamento, tolerâncias dimensionais e geométricas, pois o desenho da pré-forma é feito muito próximo da forma definitiva [1]. Um número cada vez maior de projetistas está dando preferência a componentes sinterizados em substituição aos componentes metálicos, tradicionalmente fabricados por fundição, estampagem ou usinagem [2]. Peças sinterforjadas são usadas numa grande variedade de indústrias, tais como: automotiva, máquinas agrícolas, material bélico, eletrodomésticos [3]. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma matriz de compactação que atenda o processo da metalurgia do pó para a fabricação de uma pré-forma para uma cruzeta sinterforjada.

DEFINIÇÕES

Metalurgia do pó

O processo de fabricação que produz peças, tendo como matéria-prima o pó metálico, é chamado de metalurgia do pó. Consiste em compactar e/ou modelar a mistura e aquecê-la, sob condições controladas, com o objetivo de melhorar a coesão. A característica específica do processo é que a temperatura permanece abaixo da temperatura de fusão do metal base da mistura para promover ligação mecânica entre as partículas do pó metálico [4].

A metalurgia do pó surgiu como uma tecnologia embrionária no começo do século passado e através do desenvolvimento de processos de fabricação de pós, da mistura, da conformação e da sinterização, ganhou espaço na indústria metal-mecânica. No Brasil tem-se uma história de empresas familiares que há mais de 50 anos iniciaram trabalhos intensos em metalurgia do pó e que ainda hoje estão em plena atividade, crescendo e investindo. Algumas dessas empre-

sas pioneiras são hoje parte de grupos multinacionais e outras ainda permanecem familiares [5, 6].

Normalmente este processo confere à massa de pó aglomerada as propriedades físicas e mecânicas desejadas. É comum, entretanto, a ocorrência de outras fases de processo, o qual permite alcançar valores mais rigorosos de resistência mecânica, tolerância dimensional e geométrica, rugosidade e outras. A sinterização é um processo onde a economia de material é priorizada ao extremo: não há geração de cavacos, os quais numa usinagem convencional podem representar até 50% do peso original da peça bruta, nem carepas, tendo ainda vantagem de controlar a densidade e eliminar pesos mortos indesejáveis no produto final. Mesmo levando em consideração à necessidade de operações posteriores de usinagem, uma peça sinterizada geralmente usa mais de 97% de sua matéria original [6, 7].

Peças obtidas pela metalurgia do pó são produzidas a partir da união de partículas sólidas com geometria não definida. Os materiais obtidos pela metalurgia do pó possuem poros com característica intrínseca. Na maioria das situações a porosidade é indesejada ou atua como um "defeito" no material. No entanto, em outras é imprescindível para sua aplicação [3].

Etapas do processo da metalurgia do pó

O processo da metalurgia envolve quatro etapas fundamentais: a obtenção do pó, a mistura, compactação e a sinterização dos compactados, como visto no esquema da figura 1 [8].

A matéria prima na MP constitui um fator de fundamental importância especialmente no que diz respeito à sua uniformidade. Desta forma torna-se indispensável o seu controle rigoroso. Existem vários processos para obtenção de pó metálico, sendo que sua escolha depende do conjunto de propriedades do material e das características para o pó, em função da aplicação pretendida [9]. Os métodos de obtenção podem ser mecânico, químico, físico e físico

químico. Dependendo das características desejadas do grão, mais de um método pode ser empregado sucessivamente [3].

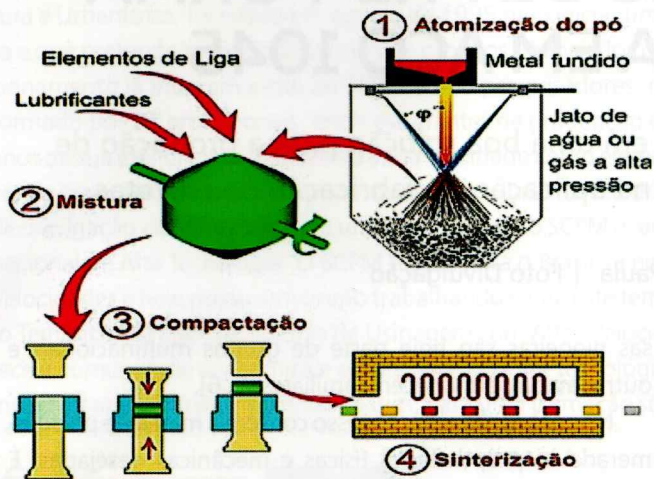


Figura 1 - Etapas do processo da metalurgia do pó [2].

Compactação uniaxial

A compactação uniaxial é a técnica de conformação de peças que consiste na compactação de uma massa aglomerada contida em uma cavidade rígida, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial através de um ou vários punções rígidos [11].

É o processo mais indicado para a produção de grandes lotes aliado a uma alta precisão dimensional e baixo custo. Utiliza-se uma prensa onde é montado um ferramental rígido, geralmente composto por matriz e punções. A densificação por compactação simples pode chegar a 92% da densidade teórica do material, ou até a 95% quando são utilizados processos especiais, tais como a compactação a morno ou a dupla compactação e dupla sinterização (2P2S ou DPDS). Caso passe pela etapa de forjamento a quente, o material poderá chegar a 100% de densificação e obter propriedades superiores ao do forjado convencional. O peso das peças varia de 1 grama a 4 kg e a produtividade é de 800 a 2.000 unidades por hora. Após a compactação, as peças já podem seguir diretamente para a etapa de sinterização, cujo ciclo varia de 3 a 5 horas [10].

A figura 2 mostra um esquema do processo.

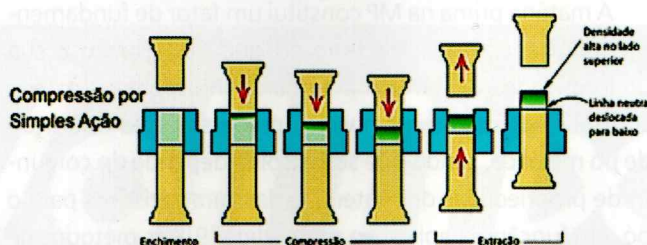


Figura 2 - Compactação de simples ação [11].

Sinterização

Define-se sinterização como o processo onde o compactado verde é aquecido a altas temperaturas, mas abaixo da temperatura de fusão do metal base, e transforma-se em corpos sólidos [3]. Em resumo, a sinterização é um processo relativamente simples que, no entanto, exige controle rigoroso das variáveis que podem influenciar a formação da liga metálica, sendo que a variável mais importante do processo de sinterização é o controle da temperatura, pois a ligação das partículas de pó metálico aumenta bastante com pequenos aumentos da temperatura de sinterização (1).

Sinterforjamento

Um dos mais recentes desenvolvimentos da técnica de metalurgia do pó e que está despertando grande interesse no setor automobilístico, sobretudo na produção de peças de aço de precisão, é o sinterforjamento. A produção de um componente sinterizado forjado passa pela produção de um pré-formado produzido por compactação e sinterização para remoção do lubrificante e recozimento pleno das partículas encruadas, seguida da operação de forjamento propriamente dita (1).

Em resumo, a técnica de sinterforjamento consiste em compactar o pó em uma pré-forma, alcançando uma densidade relativa em torno a 75%, sinterizar em atmosfera inerte e, rapidamente, transferir a peça para uma prensa de forjamento, obtendo-se, assim, a forma final do produto (1). Exemplo de peça sinterforjada na figura 3.

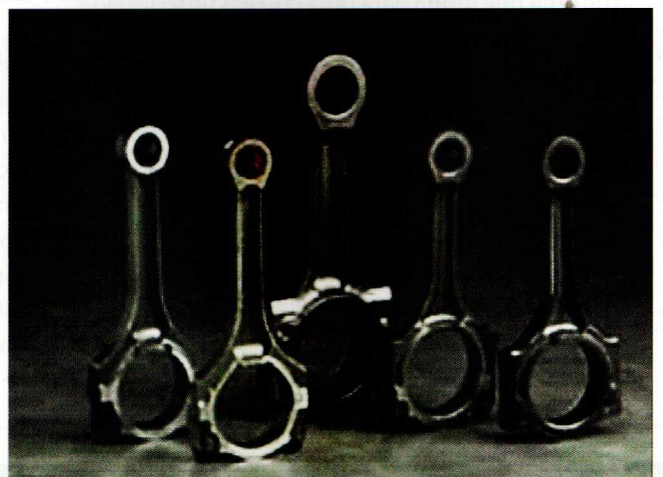


Figura 3 - Biela sinterizada forjada acabada [13].

Cruzeta

A cruzeta é uma peça responsável por transmitir a força de dois eixos em ângulos. Dessa maneira, o produto é capaz de permitir que o cardan¹ transmita a força da caixa de câmbio para o diferencial, pois a caixa de câmbio está em

nível acima do eixo diferencial [12]. A fixação da peça é feita por anéis-trava ou braçadeiras, dependendo do seu tipo de aplicação. Une-se ao cardan por meio de garfos e flanges, ou garfos e terminais.

A cruzeta pode ser aplicada em diferentes segmentos industriais, dentre eles: indústrias siderúrgicas, mineração, papel e celulose e ferroviárias; Tratores e retroscavadeiras; Pás-carregadeiras e empilhadeiras; Moto niveladora e moto-scaper; Compactadores e coletores; Betoneiras e guindastes; Caminhões *off-road*² e basculante [12]. Na figura 4 um exemplo de aplicação do uso da cruzeta.

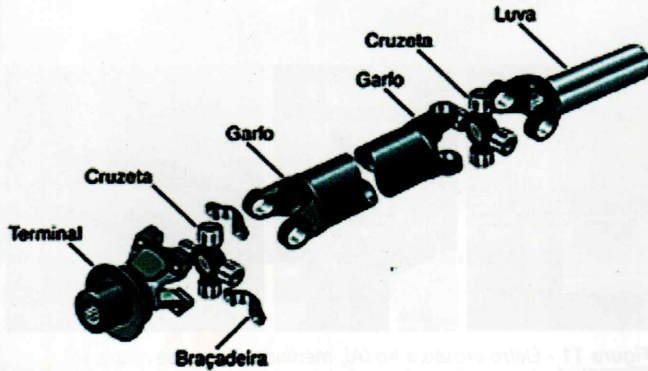


Figura 4 - Exemplo de montagem da cruzeta [14].

MATERIAIS E MÉTODOS

Como em todos os projetos de ferramentais, moldes e matrizes, por exemplo, se faz necessário ter o projeto do produto definido.

O projeto foi realizado utilizando o *software*³ de CAD⁴ SolidWorks, tendo o projeto de produto final já definido, material aço ABNT⁵ 1045⁶ e dimensões detalhadas e em perspectiva como mostrado na figura 5.

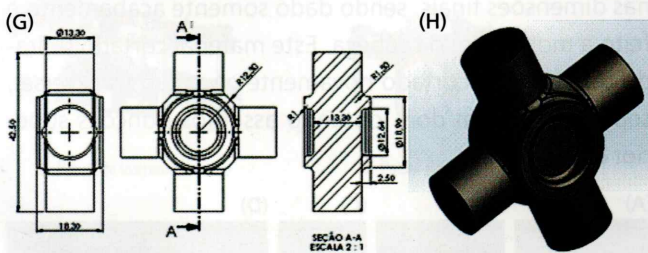


Figura 5 - Desenho da cruzeta detalhado (G) e em perspectiva (H).

Em seguida foi realizado o estudo da pré-forma, que será o *billet*⁷ da pesquisa, sendo a pré-forma ligeiramente menor do que o produto final para seu alojamento posterior na cavidade da matriz para o forjamento. A figura 6 mostra alguns passos do projeto.

Para início de projeto, no *billet* se manteve a mesma massa da cruzeta, que será o produto final. A simulação com o SolidWorks demonstrou que seria uma espessura de

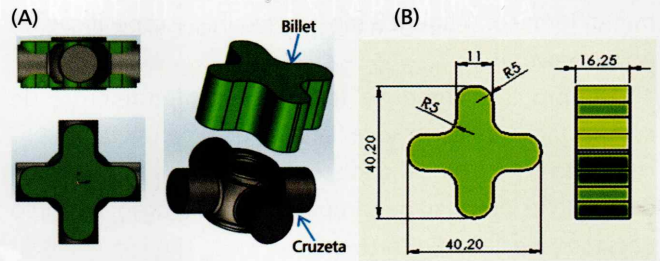


Figura 6 - Desenho de construção do billet (A) e suas dimensões (B).

16,25 mm. Esta medida auxilia no projeto da altura da matriz de compactação, pois ela será maior, obtendo recurso para ser alterado ao ser colocado mais pó metálico, devido aos processos posteriores da sinterização e também do forjamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O fluxograma da figura 7 apresenta um resumo do procedimento adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

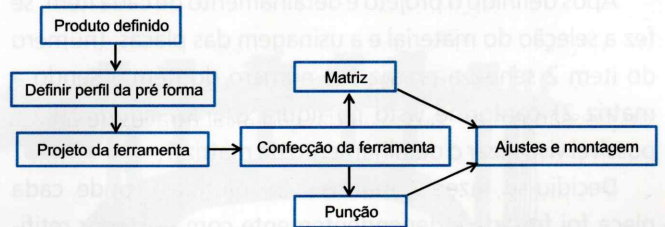
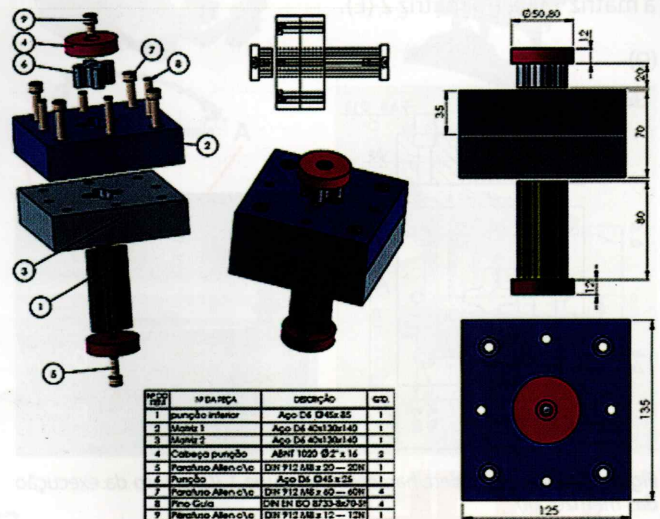


Figura 7 - Fluxograma do trabalho desenvolvido.

Projeto do ferramental

A partir do projeto de produto definido, denominado como cruzeta (figura 5), foi determinado o perfil da pré-forma (figura 6) sendo o compactado verde.

No projeto do ferramental foram determinadas as dimensões de cada item, especificações de materiais e trata-



ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	punção inferior	Aço D6 Ø45x85	1
2	Mante 1	Aço D6 Ø40x130x140	1
3	Mante 2	Aço D6 Ø40x130x140	1
4	Colteira punção	ABNT 1020 Ø2" x 16	2
5	Parafuso Allen c/v	DIN 912 D6 x 20 - 20H	1
6	Punção	Aço D6 Ø45 x 25	1
7	Parafuso Allen c/v	DIN 912 D6 x 80 - 60H	2
8	Pin. Cruz	DIN 914 E2 Ø12x30x30	4
9	Parafuso Allen c/v	DIN 912 D6 x 12 - 12H	1

Figura 8 - Perspectiva e vista explodida (A) e dimensões externas da ferramenta (B).

mento térmico. A figura 8 mostra detalhes e especificações do ferramental.

No projeto, como se trata de um ferramental de compactação uniaxial, se fez análise de área útil de preenchimento do pó na cavidade, bem como dos movimentos dos punções no curso de compactação e extração. Exemplo dessa sequência na figura 9.

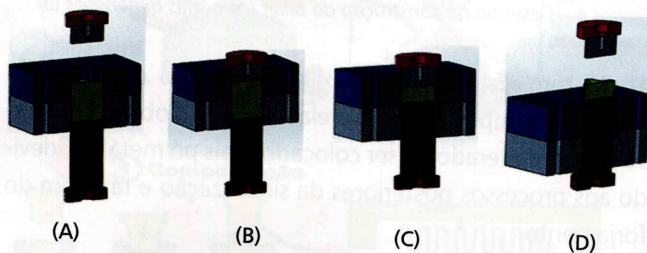


Figura 9 - Funcionamento passo a passo da ferramenta de compactação, mostrando vista em corte. (A) Pó metálico colocado na cavidade. (B) Punção inferior e ou superior inicia a prensagem. (C) O material é compactado. (D) Material compactado é extraído da cavidade.

Confecção da matriz

Após definido o projeto e detalhamento de cada item, se fez a seleção do material e a usinagem das placas, (número do item 2 sendo a matriz 1 e número do item 3 sendo a matriz 2) conforme visto na figura 8A. Na figura 10Q é possível visualizar o detalhamento da matriz 1.

Decidiu-se fazer 2 matrizes (bi partidas), onde cada placa foi fresada independentemente com posterior retificação das faces, furações de parafusos de fixação das placas e de pinos guia e principalmente um furo central feito antes do tratamento térmico, para posterior corte na máquina de eletroerosão a fio.

A figura 10R mostra o furo de pino guia (A), o furo central para passagem do fio na máquina de eletroerosão a fio (B), o alojamento, rebaixo para fixação de parafusos (C), a matriz 1 (D), e a matriz 2 (E).

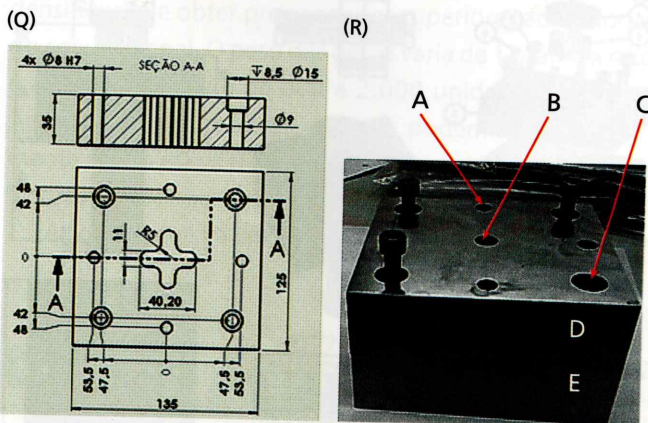


Figura 10 - Desenho detalhamento da matriz 1 (Q) e foto da execução das matrizes (R).

Depois de realizado o tratamento térmico de têmpera⁸ e

revenimento⁹ dos aços D6¹⁰, foi executado o corte da cavidade pré-forma da cruzeta.

Existem muitos processos na área da ferramentaria para a confecção deste tipo de ferramental. Na figura 11 algumas partes do processo realizado utilizando a máquina de eletroerosão a fio modelo Robocut α -OíE, e a medição da dureza executada em um durômetro modelo Mitutoyo HR-300, que identificou dureza de 55-56 HRC¹¹. Também a medição da rugosidade¹² da cavidade cortada na eletroerosão a fio, utilizado um rugosímetro modelo Mitutoyo SJ-210, obteve um resultado de R_a 2.563 microns.

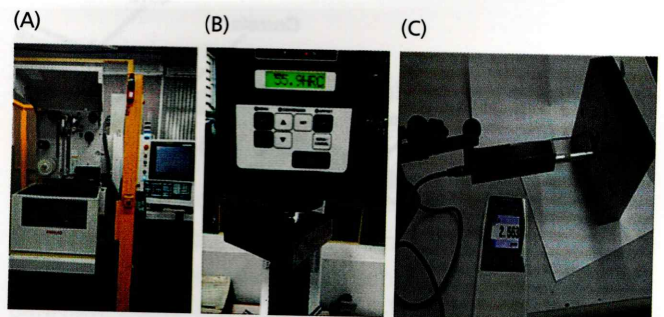


Figura 11 - Eletro erosão a fio (A), medindo dureza da matriz (B), rugosidade da superfície (C).

Confecção dos punções

Os punções foram confeccionados em aço D6 e a cabeça dos punções em aço ABNT 1020. No processo de fabricação dos punções, demonstrado na figura 12, foi usinado o bloco, aço inteiriço com sobre metal, executadas as roscas em seus topos para posteriormente parafusar a cabeça do punção. Na sequência o bloco foi temperado e revenido.

Na máquina de eletroerosão a fio foi cortado o perfil já nas dimensões finais, sendo dado somente acabamento e feito a montagem da cabeça. Este material cortado retirado do bloco foi cortado novamente na seção transversal, separando-os em dois, obtendo assim os punções superior e inferior.

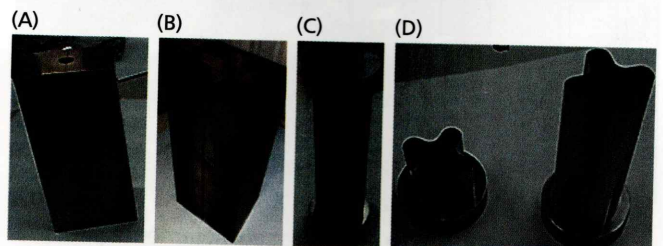


Figura 12 - Bloco temperado (A), Corte na eletro a fio (B), Punção dado acabamento (C), Punções separados (D).

Logo, tendo confeccionado a matriz e os punções, foram realizados os testes e ajustes de montagem do ferramental, como apresentado na figura 13.

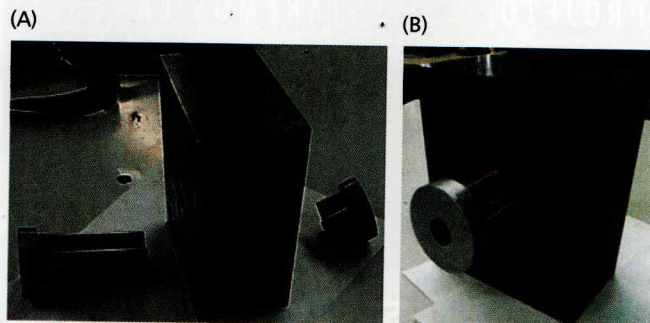


Figura 13 - Ferramenta confeccionada (A), Ferramenta ajustada e montada, matriz e punções (B).

CONCLUSÃO

No início do projeto se analisou as matérias primas e meios de fabricação, como tipo de material, dimensões e máquinas necessárias para confecção do conjunto.

Geralmente este tipo de matriz é feito em um único bloco. Para este trabalho foram utilizados dois blocos, sendo uma matriz bipartida, onde já se prevê alguns ganhos como facilidade de manutenção para redução de custo em caso de quebra ou desgaste da matriz, por ser um aço nobre.

Moldes e matrizes de peças técnicas possuem um valor considerável, refletindo-se em um item agregado no custo do produto final. Portanto, já no projeto o projetista analisa possíveis falhas e facilidades de ajustes e manutenções do ferramental.

A matriz de compactação aqui apresentada, o processo de confecção e o aço utilizado atendem com eficácia a aplicabilidade para produção de cruzetas compactadas para uso no sinterforjamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e à instituição de apoio financeiro CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Forjamento de sinterizados - LdTM - UFRGS - Metalurgia do pó. [Acesso 23/09/2014] Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ldtm/possibilidades/sinterizados/sinterizados.htm>>.
- [2] Grupo setorial de metalurgia do pó. *Histórico da metalurgia do pó*. [Acesso 24/09/2014] Disponível em: <<http://www.metalurgiadopo.com.br/Paginas/detalhes.asp?iType=1&iPic=1>>.
- [3] Pavanati, Henrique Cezar. *Processo de fabricação - Meta-*

lurgia do pó. [Acesso 25/09/2014]. Disponível em: http://pavanati.com.br/doc/04_-_Processos_de_Fabricacao_-_Metalurgia_do_Po.pdf.

- [4] Silva, Angelus Giuseppe Pereira da; Júnior, Clodomiro Alves. *A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização*. Scielo. 1998. [Acesso 12/03/2015]. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69131998000600004&script=sci_arttext
- [5] Grupo Setorial de Metalurgia do Pó - *A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental*, 1ª edição. Metallum eventos técnicos e científicos, São Paulo, 2009.
- [6] Chiaverini, Vicente. *Metalurgia do pó: técnica e produtos*. 3ª edição. São Paulo, SP, ABM, 2001.
- [7] Olevsky, Eugene A. *Theory of sintering: from discrete to continuum*. Materials Science and Engineering. 1998. Páginas 41-100.
- [8] Industrial Heating. [Acesso 26/08/2014]. Disponível em: <http://www.revistaih.com.br/coluna-metalurgia-do-po/a-metalurgia-do-po/2601>.
- [9] Brito, F. Iran Gomes de; Medeiros, Katarine F.; Lourenço, Jorge Magner. *Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó*. Holos. 2007. [Acesso 10/03/2015]. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/139/129>.
- [10] Coluna: Metalurgia do Pó. [Acesso 18/02/2017]. Disponível em: http://www.metalurgiadopo.com.br/Downloads/2013-03-Revista_IH-Compactacao.pdf
- [11] Menezes, Roberto Cavalcante de. *Estudo da sinterização de cavacos de aço ferrítico*. [Acesso 18/02/2017]. http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/12748/1/RobertoCM_DISSERT.pdf
- [12] Soluções Industriais. [Acesso 12/03/2017]. Disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/compcardan/produtos/elementos-de-transmissao/cruzeta>
- [13] Metalurgia do Pó Pallini [Acesso 16/04/2017]. http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20090827_MetalurgiadoPo_Pallini.pps.
- [14] <http://garagem4x4.blogspot.com.br/2015/12/funcionamento-do-eixo-cardan.html> [Acesso 16/04/2017].
- [15] <http://www.metalurgiadopo.com.br/Downloads/BannerComp-r02.jpg> [Acesso 05/05/2017]. ■

¹**Cardan:** O eixo cardan é composto de dois eixos tubulares: um primário, centrado à fonte motriz, e outro secundário, centrado ao eixo de tração. Nas extremidades desse tubo existem conexões chamadas de juntas universais onde se encontram as cruzetas [wikipedia.org].

²**Off-Road:** do inglês off = fora e road = estrada. Veículo fora de estrada, para uso em áreas não pavimentadas.

³**Software:** ou programa de computador, é uma sequência de instruções a serem seguidas e/ou executadas, na manipulação, redirecionamento ou modificação de um dado/informação.

⁴**CAD:** do inglês Computer Aided Design, significa projeto assistido por computador.

⁵**ABNT:** fundada em 1940, a Associação Brasileira de Normas Técnicas é o órgão responsável pela normalização técnica no país, fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro. É uma entidade privada, sem fins lucrativos, de utilidade pública, reconhecida como único Foro Nacional de Normalização através da Resolução nº 07 do CONMETRO, de 24.08.1992.

⁶**Aço 1045:** aço de boa usinabilidade, boa resistência mecânica, média soldabilidade e alta forjabilidade. Cores de identificação: Azul.

⁷**Billet:** do inglês, significa lingote.

⁸**Têmpera:** Tratamento térmico caracterizado pelo resfriamento em velocidade superior a velocidade crítica de têmpera de uma liga ferro-carbono, a partir de uma temperatura acima da zona crítica para os aços hipoeutetóides e geralmente dentro da zona crítica para os aços hipereutetóides, resultando em transformação da austenita em martensita.

⁹**Revenimento:** é um processo feito após o endurecimento por têmpera. Peças que sofreram têmpera tendem a ser muito quebradiças. A fragilidade é causada pela presença da martensita. A fragilidade pode ser removida pelo revenimento. O resultado do revenimento é uma combinação desejável de dureza, ductilidade, tenacidade, resistência e estabilidade estrutural. As propriedades resultantes do revenimento dependem do aço e da temperatura do revenimento [www.cimm.com.br].

¹⁰**Aço D6:** aço para trabalho a frio, com alto grau de indeformabilidade, com altos teores de carbono (C) e cromo (Cr), temperável em óleo, banho de sal fundido ou ar, de boa tenacidade, alta temperabilidade, alta resistência mecânica e alta resistência ao desgaste. A adição de tungstênio (W) confere a este aço uma retenção de corte. A dureza superficial, na condição temperada e revenida, pode alcançar 62 HRC. Cores de identificação: Amarelo-Verde-Amarelo.

¹¹**Dureza Rockwell:** é um método de medição direta de dureza desenvolvido por Stanley Pickett Rockwell em 1922, nos Estados Unidos. É um dos mais utilizados em indústrias e um dos mais simples e que não requer habilidades especiais do operador. Além disso, várias escalas diferentes podem ser utilizadas através de possíveis combinações de diferentes penetradores e cargas, o que permite o uso deste ensaio em praticamente todas as ligas metálicas, assim como em muitos polímeros. Sua unidade é HRC.

¹²**Rugosidade aritmética ou rugosidade média ou desvio médio aritmético (R_a):** é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição l_m [www.fem.unicamp.br].



Márcio José Torres de Paula - Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul - Campus Sapucaia do Sul, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, Universidade Federal

do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. Professor do SENAI/RS - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, São Leopoldo, RS, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/1018360006589395>
marciojosetorres3@gmail.com

Fábio Jones Crucillo Ramos - Engenheiro Mecânico pelo Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul - Campus Sapucaia do Sul, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. Coordenador da Engenharia de Componentes na AEL Sistemas, Porto Alegre, RS, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/6949701792779243>
fabiocrucilloramos@gmail.com

Vinícius Martins - Professor do Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul - Campus Sapucaia do Sul. Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
viniciushiper@yahoo.com.br

Lírio Schaeffer - Engenheiro Mecânico, Doutorado em Conformação Mecânica - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule/-Aachen/Alemanha (1982). Desde 1976 é Professor Titular na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS - Departamento de Metalurgia e coordena o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), atuando principalmente nas seguintes áreas: forjamento, estampagem, metalurgia do pó, materiais biomédicos. Tem experiências na área de Energias Alternativas. Atualmente é consultor ad hoc da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), consultor do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

<http://lattes.cnpq.br/1093242836059112>
schaeffer@ufrgs.br