



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Lemos, Sérgio; Costa, Eleani Maria da; Santos, Carlos Alexandre dos; Costa, Cesar Edil da; Dedavid, Berenice Anina

Aplicação do processo de consolidação de pós metálicos por constrição radial (CCR) para a produção de pré-formas de ferro

Rem: Revista Escola de Minas, vol. 63, núm. 3, julio-septiembre, 2010, pp. 509-516

Escola de Minas

Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416593013>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

Metalurgia & Materiais

Aplicação do processo de consolidação de pós metálicos por constrição radial (CCR) para a produção de pré-formas de ferro

The use of the radial constriction consolidation (RCC) process to obtain billets from iron powder

Sérgio Lemos

Mestre, PGETEMA/FENG - PUCRS
E-mail: ctrade@terra.com.br

Eleani Maria da Costa

Professora
FENG - PGETEMA - PUCRS
E-mail: eleani@pucrs.br

Carlos Alexandre dos Santos

Professor
FENG - PGETEMA - PUCRS
E-mail: carlos.santos@pucrs.br

Cesar Edil da Costa

Professor, CCT - PPCEM - UDESC
E-mail: edil@joinville.udesc.br

Berenice Anina Dedavid

Professora
FENG - PGETEMA - PUCRS
E-mail: berenice@pucrs.br

Resumo

Consolidação por Constrição Radial (CCR) é uma técnica de metalurgia do pó que possibilita a obtenção de peças metálicas próximas da forma final, com alta densidade e de formas complexas, com custos de produção mais baixos que as tecnologias convencionais. CCR assemelha-se, em alguns aspectos, ao processo de compactação isostática a quente, sendo que as principais diferenças referem-se ao fato de que o processo CCR utiliza moldes cerâmicos fabricados a partir do processo de microfusão e usa um meio compressor secundário na forma de pó, ambos confinados em um container metálico. Nesse trabalho, desenvolveu-se um sistema experimental de CCR, visando à produção de pré-formas de ferro de alta densidade. Como meio compressor secundário, foi utilizado pó de argila calcinada. As pré-formas produzidas foram caracterizadas quanto à densidade, microestrutura e dureza. Observou-se que a configuração do container metálico/meio compressor secundário/molde cerâmico tem grande influência nas características de densidade e dimensionais das pré-formas. As pré-formas obtidas apresentaram consolidação satisfatória do pó como indicado pela microestrutura apresentada, alta densidade, elevada dureza, pouca formação de óxido e uma correlação direta entre os valores de dureza e densidade.

Palavras-chave: Constrição radial, consolidação de pós metálicos, microfusão, metalurgia do pó.

Abstract

The Radial Constriction Consolidation (RCC) process can be considered a powder metallurgical technique that allows for the fabrication of components with complex geometries, near-net-shape and full density at low production costs when compared to the traditional process. In some aspects, the RCC process is similar to the hot isostatic pressing process, but it uses a ceramic mold confectioned by investment casting and a powder as a secondary pressing media, all of which are confined in a metallic container. In this paper, a RCC experimental system was developed aiming to produce iron billets with the characteristics of near-net-

shape and high density. Clay powder was used as a secondary pressing media. The obtained billets were characterized in terms of density, microstructure and hardness. It was observed that the configuration of the metallic container/secondary pressing media/ceramic mold has an important influence on the characteristic of density and near-net-shape of the billets. The billets presented satisfactory powder consolidation as shown in their microstructure, high density, elevated hardness, little oxide formation and a direct correlation between the values of density and hardness.

Keywords: Radial constriction consolidation, iron powder, investment casting, powder metallurgy.

1. Introdução

Nos últimos anos, com o desenvolvimento das técnicas de metalurgia do pó, tem sido possível obter produtos de alta densidade, homogeneidade química e microestrutural, tanto em componentes metálicos, como cerâmicos, com baixo custo, quando se compara a obtenção desses produtos com os processos de fabricação tradicionais. O processo mais utilizado para a fabricação de componentes próximos da forma final é o processo de compactação isostática a quente [Bocanegra-Bernal, 2004; Ferguson, 1985; Kim, 1999; Loh, 1992]. O processo de compactação isostática a quente é, relativamente, caro, uma vez que envolve vasos de pressão e outros sistemas para evitar a oxidação do pó e penetração de gases, além de custos em ferramental. Em função disso, vários processos alternativos surgiram nas últimas décadas, tais como processos CERACON, ROC (Rapid Omnidirectional Compaction), STAMP e Consolidação por Constrição Radial (CCR). Esses processos produzem condições de pressão quase isostática, quando são usados equipamentos de compactação convencionais associados com o uso de um meio compressor secundário (material cerâmico ou grafite) [Ferguson, 1984 e 1985; Ecer, 1987 e 2004]. O processo

CCR foi patenteado em 1987 e é uma técnica de metalurgia do pó que utiliza sistema de prensagem a quente para obtenção de peças próximas da forma final, de altas densidades, com formas metálicas complexas e custos de produção mais baixos do que as tecnologias convencionais (Ecer, 1987). Segundo o autor da patente, o processo CCR incorpora as melhores características de três processos de produção de peças próximas da forma final: microfusão, forjamento e prensagem a quente de pós-metálicos de alta densidade. CCR se assemelha aos processos de metalurgia do pó convencionais em função da matéria-prima utilizada e demais procedimentos operacionais, diferindo pelo fato de que utiliza como molde cascas cerâmicas fabricadas a partir do processo de microfusão. Portanto esse processo tem potencial para produzir peças de alta complexidade geométrica e paredes finas devido ao uso de moldes de microfusão, associado com boa resistência mecânica devido às características de forjamento e com a flexibilidade de poder utilizar diferentes ligas porque utiliza pós-metálicos ou cerâmicos como matéria-prima (Ecer, 1987 e 2004).

Esse trabalho tem como principal objetivo estudar o processo CCR como técnica alternativa aos processos atualmente existentes para obtenção de pré-formas cilíndricas e com altas densidades, utilizando-se pó de ferro e moldes cerâmicos fabricados a partir do processo de microfusão.

2. Materiais e métodos

2.1 Matéria-prima utilizada: pó de ferro

Para a realização dos experimentos, foi utilizado o pó de ferro denominado ASC100.29 produzido pela Höganäs AB, o qual é um pó de ferro atomizado com compressibilidade elevada e que, segundo o fabricante, possibilita a obtenção de compactados com densidades de até $7,2 \text{ g/cm}^3$ com uma única compactação. ASC 100.29 é, particularmente, apropriado para peças estruturais de alta

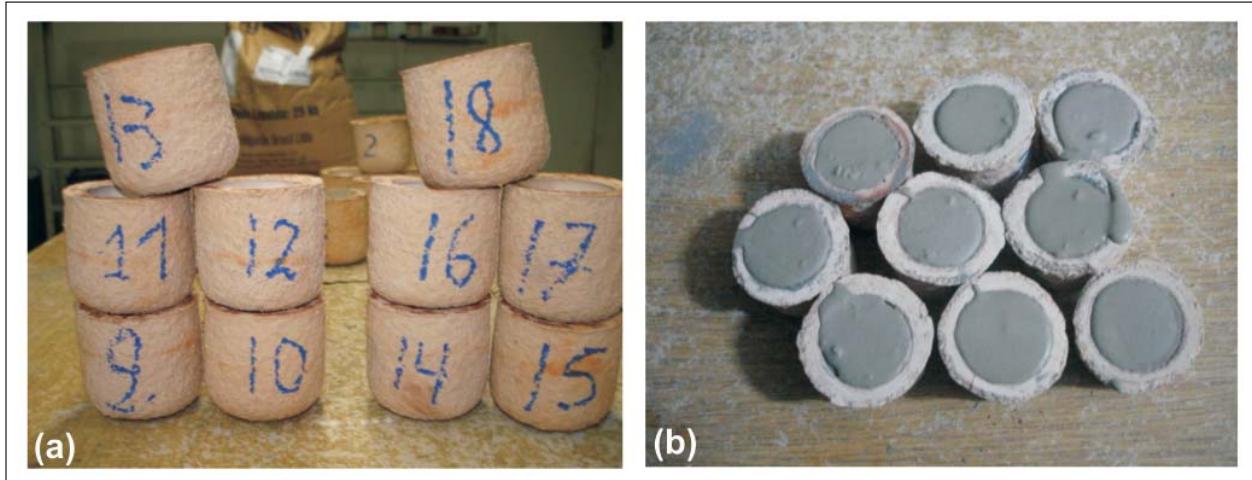
densidade e, também, como material base para aplicações magnéticas [Höganäs, 2004]. A Tabela 1 apresenta as propriedades típicas do pó ASC 100.29.

2.2 Produção dos moldes cerâmicos

Os moldes cerâmicos foram produzidos a partir de processo tradicional de microfusão. Foi utilizada cera virgem de carnaúba e o material para preparação dos banhos cerâmicos foi adquirido da empresa Unimim do Brasil Ltda. Os moldes cerâmicos (Figura 1a) são cilíndricos com a parte superior totalmente aberta. A forma cilíndrica foi escolhida por simplificar a confecção da matriz para injeção da cera. O isolamento do pó da parte superior do molde com o meio compressor secundário foi realizado por meio da deposição de uma camada de lama cerâmica de, aproximadamente, 1 mm de espessura diretamente sobre o pó metálico solto já inserido no molde, como mostra a Figura 1b. Inicialmente, foram efetuados nove banhos, produzindo uma espessura de parede de, aproximadamente, 9,0 mm. Esse molde foi utilizado para a produção da pré-forma de número 1 e teve altura externa de 61,85 mm e diâmetro externo de 63,21 mm. Posteriormente, diminuiu-se para cinco banhos produzindo uma espessura de parede média de 5,9 mm, já que a patente do processo sob estudo cita uma espessura de parede de apenas 3,5 mm (Ecer, 1987), sem explicar quais as razões para essa exigência. Analisando o processo, há indicações de que, quanto mais espessa a parede do molde cerâmico descartável, maior resistência oferecerá à força de compressão exercida pelo meio secundário compressor, dificultando a transmissão dessa pressão à peça de trabalho e, por consequência, prejudicando o processo de consolidação. As pré-formas de números 2 a 6 foram produzidas com um molde cerâmico de altura externa média de 58,57 mm e diâmetro externo médio de 57,35 mm. As pré-formas 7 a 12 foram produzidas com moldes com as dimensões reduzidas (altura externa

Tabela 1 - Propriedades típicas do pó de ferro ASC100.29 [Höganäs, 2004].

Análise Química		Carbono: < 0,01%
		Outros: 0,08%
Densidade Aparente (pó solto)		2,98 g/cm ³
Compressibilidade		Resistência Verde
Pressão de Compactação		Pressão de Compactação
400 MPa	6,77 g/cm ³	400 MPa
600 MPa	7,20 g/cm ³	600 MPa
800 MPa	7,45 g/cm ³	800 MPa
Granulometria		>212µm= 0%; >150µm= 8%; < 45µm= 23%
		< 150µm e > 45µm = 69%

**Figura 1** - (a) Moldes cerâmicos após deceragem e calcinação. (b) Moldes preenchidos com pó de ferro ASC 100.29 e selados com lama cerâmica.

média de 35,33 mm, diâmetro externo médio de 31,00 mm e espessura de parede média de 4,6 mm) para atingir pressões maiores, em função da limitação da capacidade da prensa hidráulica, e para diminuir custos com matéria-prima. A extração da cera de dentro do molde cerâmico (deceragem) foi feita pelo processo denominado *flash*, em autoclave.

2.3 Meio compressor secundário

Como meio compressor secundário, testou-se o pó de argila calcinada obtido por meio da moagem do tijolo de construção civil, o qual foi posteriormente peneirado. As principais características de compressibilidade do pó de argila calcinada são: densidade de 2,00 g/cm³ à pressão de

compactação de 300 MPa, densidade de 2,07 g/cm³ à pressão de compactação de 400 MPa e densidade de 2,02 g/cm³ à pressão de compactação de 500 MPa. Foi realizada a análise granulométrica segundo a NBR NM 248/03, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

2.4 Configuração container metálico/meio compressor secundário/molde cerâmico

Para a constituição do container metálico, foi utilizado um tubo de aço SAE 1026 sem costura, de espessura de parede de 15 mm, fechado na parte inferior. Foram testados três tipos de configuração container/meio compressor secundário/molde cerâmico, como ilustra a Figura 2. Na primeira configuração,

Figura 2a, a altura do container foi de, aproximadamente, 192 mm. O molde cerâmico foi centralizado no container de forma a propiciar uma distribuição simétrica do meio compressor secundário nas laterais e nas partes superior e inferior do mesmo. Esse tipo de container foi utilizado nos primeiros dois experimentos. Como as pré-formas produzidas apresentaram deformação lateral, foi levantada a hipótese de que a configuração anteriormente apresentada poderia proporcionar excesso de meio compressor secundário na parte inferior do molde cerâmico. Para testar essa hipótese, posicionou-se o molde cerâmico apoiado no fundo do container, cuja altura foi reduzida para 96 mm, devido o curso do êmbolo da prensa, mantendo o meio secundário compressor apenas nas laterais e na parte superior, conforme esquema ilustrativo da Figura 2b. A configuração de número 2 foi utilizada para a produção das pré-formas de número 3 a 9 e proporcionou uma camada de meio compressor na parte superior do molde cerâmico de, aproximadamente, 66 mm e de 34 mm nas laterais. Posteriormente, para a produção das pré-formas 10 a 12, as dimensões do container metálico foram modificadas (43 mm x 61mm) de forma a reduzir a quantidade de massa de pó cerâmico nas paredes laterais (2 mm). Para a produção das pré-formas 7 a 12, foi adicionalmente utilizada uma

matriz de compressão fabricada com aço SAE 1045, conforme ilustra a Figura 2c. Foi necessário usar a matriz de compressão para se conter a deformação plástica do container, durante o processo de compactação a quente.

2.5 Parâmetros do processo CCR

Segundo a literatura, a temperatura típica de sinterização desse pó varia de 1120 a 1250°C e o tempo de sinterização, de 30 a 60 minutos, considerando-se os processos tradicionais da M/P [Höganäs, 2004]. Já a patente em questão (Ecer, 1987) cita uma temperatura de 1038°C para pó de aço e uma pressão de compactação entre 276 e 414 MPa para pós de aço baixo carbono. Com base nas propriedades do pó metálico fornecidas pelo fabricante, nas informações disponibilizadas na patente em estudo (Ecer, 1987) e nas características dos equipamentos disponíveis para a realização desse trabalho, foram definidos os seguintes parâmetros de processo: faixa de pressão de compactação: 360 a 424 MPa; tempo de compactação: 5 a 10 s; temperatura de sinterização: 1120°C; tempos de sinterização: 15, 45 e 90 minutos. A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros de processo utilizados nos experimentos realizados. Para a compactação das pré-formas, utilizou-se uma prensa hidráulica automática com capacidade de 60 toneladas, equipada com manômetro

Tabela 2 - Análise granulométrica do pó de argila calcinada utilizado segundo a NBR NM 248/03.

Peneira	Massa Retida em Gramas	Percentual Retido
1180	11,50	1,22
600	141,00	14,93
300	108,50	11,49
150	134,50	14,24
<150	546,00	57,81
Total	941,50	99,69



Figura 2 - Esquema ilustrativo das diferentes configurações utilizadas do container/meio compressor secundário/ molde cerâmico.

analógico para leitura até 40 MPa, unidade hidráulica com capacidade para até 30 MPa e êmbolo da haste de 170 mm de diâmetro. Para o aquecimento do container contendo o pó compressor secundário e molde cerâmico preenchido com o pó de ferro, foi utilizado um forno resistivo tipo mufla. Para controle da temperatura do pó de ferro, foi utilizado um termopar tipo K posicionado no selo confeccionado com a lama refratária, localizado na parte superior do molde.

2.6 Caracterização das pré-formas produzidas

As pré-formas de ferro compactadas produzidas foram caracterizadas quanto a sua densidade, microestrutura e dureza. A densidade foi estimada a partir da determinação do volume da pré-forma produzida (cálculo) e de sua massa, utilizando uma balança com precisão de 0,01g. Para minimizar erros, na determinação do volume, foi efetuada a usinagem da pré-forma, quando necessário, para a obtenção de um cilindro de dimensões uniformes. A determinação da densidade pelo princípio de Arquimedes não foi utilizada em virtude de o volume das pré-formas ser relativamente grande, o que geraria um erro considerável na leitura do volume de líquido deslocado. Para a análise da microestrutura das pré-formas, utilizaram-se a microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com a finalidade de verificar a eficiência da compactação, as pré-formas foram cortadas no sentido

Tabela 3 - Principais parâmetros de processo CCR.

Pré-forma	Configuração do container	Dimensões do molde (mm)	Dimensões do container (mm)	Pressão (MPa)	Tempo (min)	Camada nas laterais (mm)
1	1	φ ext: 63,21 , e = 9,35	φ ext: 140	378	15	31 mm
		Altura: 61,85	Altura: 192			
2	1	φ ext: 57,35 , e = 5,90	φ ext: 140	360	90	34 mm
		Altura: 58,57	Altura: 192			
3	2	φ ext: 57,35 , e = 5,90	φ ext: 140	362	45	34 mm
		Altura: 58,57	Altura: 96			
4	2	φ ext: 57,35 , e = 5,90	φ ext: 140	360	45	34 mm
		Altura: 58,57	Altura: 96			
5	2	φ ext: 57,35 , e = 5,90	φ ext: 140	366	45	34 mm
		Altura: 58,57	Altura: 96			
6	2	φ ext: 57,35 , e = 5,90	φ ext: 140	361	45	34 mm
		Altura: 58,57	Altura: 96			
7	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 140	409	45	43 mm
		Altura: 35,33	Altura: 96			
8	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 140	416	45	43 mm
		Altura: 35,33	Altura: 96			
9	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 140	419	45	43 mm
		Altura: 35,33	Altura: 96			
10	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 43	409	45	2 mm
		Altura: 35,33	Altura: 61			
11	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 43	418	45	2 mm
		Altura: 35,33	Altura: 61			
12	3	φ ext: 38,31 , e = 4,66	φ ext: 43	424	45	2 mm
		Altura: 35,33	Altura: 61			

longitudinal à aplicação da pressão e a microestrutura analisada em diferentes regiões: parte superior, parte inferior, borda esquerda, borda direita e centro. Técnicas metalográficas convencionais foram utilizadas, para a preparação das amostras, para análise microestrutural. O ataque químico utilizado para a revelação da microestrutura foi Nital 1% (1% em volume de ácido nítrico em água). Determinou-se a dureza Brinell nas pré-formas que apresentaram elevada densidade e deformação moderada ou sem deformação (pré-formas 7-12), usando esfera de aço de 5 mm de diâmetro e consequente carga de 250 kgf. Para a determinação da dureza, foram efetuadas dez medições em cada pré-forma: cinco medições na face superior e cinco medições na face inferior.

3. Resultados e discussões

3.1 Características gerais das pré-formas obtidas

A Tabela 4 apresenta um resumo das densidades obtidas para as pré-formas produzidas. As pré-formas de números 1 e 2, as quais foram produzidas com container mais alto (192mm), uma pressão média de 369 MPa e uma configuração container/meio compressor secundário/molde cerâmico que propiciou meio compressor secundário na parte inferior do molde cerâmico (configuração 1), apresentaram baixas densidades (em média 66% da densidade especificada pelo fabricante do pó). Além disso, observou-se que o tempo de sinterização não influenciou, significativamente, nos resultados de densidade. Sabe-se que tempos elevados de aquecimento proporcionam uma maior oxidação do pó de ferro, o que pode ser a razão pela qual a pré-forma 2 (90 min) apresentou densidade inferior a pré-forma 1 (15 min). As pré-formas apresentaram deformação (escoamento) lateral significativa. Nas pré-formas de números 3 a 6, as quais foram produzidas com um container mais baixo (96 mm), uma pressão média de 362

MPa e uma configuração container/meio compressor secundário/molde cerâmico que eliminou o meio compressor secundário da parte inferior do molde cerâmico (configuração 2), observou-se um aumento significativo no nível de densidades (ver Tabela 4), alcançando um valor médio de 94,3% da densidade especificada pelo fabricante do pó. Porém as pré-formas apresentaram também deformação (escoamento) lateral, mas em menor grau que as pré-formas 1 e 2. Além disso, observou-se a ocorrência de deformação plástica significativa do container durante o processo de compactação a quente, podendo ter sido esse o fator que causou essa deformação lateral observada nas pré-formas. Portanto tais resultados indicam que a prensagem a quente do container metálico deva ser efetuada com o container confinado dentro de uma matriz metálica à temperatura ambiente, para evitar que as forças de compressão exercidas pela prensa provoquem deformação plástica do container e, por consequência, prejudiquem a conformação da pré-forma.

Nas pré-formas de 7 a 9, as quais foram produzidas com um container de 96mm, uma pressão média de 415 MPa, uma configuração container/meio compressor secundário/molde cerâmico que eliminou o meio compressor secundário da parte inferior do molde e que usou uma matriz metálica para compressão (configuração 3) alcançou-se excelente nível de densidades (Tabela 4), superando, inclusive, a densidade especificada pelo fabricante do pó. Contudo, apesar de as pré-formas de 7 a 9 terem alcançado elevadas densidades, elas apresentaram deformação bastante irregular no sentido radial da peça. Uma hipótese possível para a deformação (ou escoamento) é o excesso de meio pressurizador secundário nas laterais do container, uma vez que o container e o molde não se compactam a taxas suficientes para impedir o escoamento do pó metálico. A redução significativa da quantidade de massa de pó cerâmico nas paredes laterais permitiu a obtenção de pré-formas (números 10 a 12) de alta densidade e com características dimensionais satisfatórias.

Tabela 4 - Densidades das pré-formas produzidas nos experimentos.

Pré-forma	Densidade Medida (g/cm³)	% da Densidade do Fabricante do Pó (6,77 g/cm³ a 400MPa)
1	4,79	70,72%
2	4,14	61,21%
3	6,14	90,66%
4	5,74	84,74%
5	6,97	102,91%
6	6,70	98,90%
7	7,36	108,69%
8	6,65	98,16%
9	7,51	110,92%
10	6,95	102,69%
11	6,43	95,00%
12	6,98	103,06%

3.2 Características microestruturais das pré-formas obtidas

A Figura 3 mostra as micrografias obtidas por MEV da pré-forma 5, a qual foi aquecida a 1120 C durante 45 minutos e compactada a 366 MPa. A Figura 4 mostra micrografias ópticas da região central das pré-formas 7, 8, 9, 10, 11 e 12. De uma forma geral, pode-se observar que a consolidação do pó foi adequada, a microestrutura é semelhante à microestrutura típica desse pó compactado apresentada pelo fabricante. Nessa microestrutura típica, tem-se uma matriz ferrítica com presença de poucas porosidades e/ou óxido próximos dos contornos de grão. A presença de óxidos em relativa baixa quantidade indica que o meio compressor secundário, além de atuar como isolante térmico, atua, também, como isolante ambiental, uma vez que não se utilizou forno com atmosfera controlada durante a etapa de aquecimento do pó. Contudo observou-se que a microestrutura não é homogênea em toda a pré-forma, com uma tendência de menor consolidação na periferia da mesma.

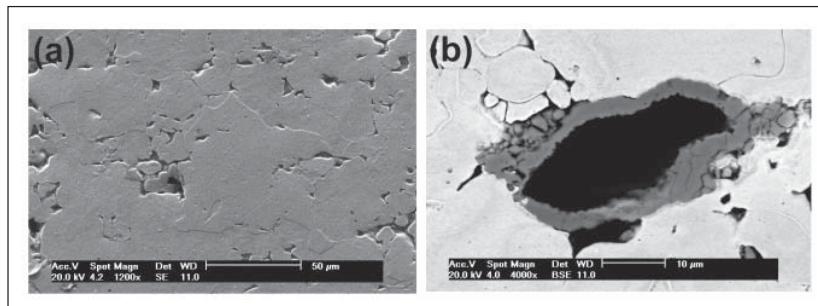


Figura 3 - (a) Microestruturas da pré-forma 5. **(b)** Detalhe de uma porosidade e formação de óxido.

3.3 Dureza das pré-formas e correlação com densidade

Os resultados referentes às medidas de dureza (valores médios e desvios-padrões calculados) para as pré-formas que apresentaram mais alta densidade (pré-formas 7 a 12) são apresentados na Figura 5. Observa-se que a dureza na parte inferior das pré-formas foi discretamente maior que a parte superior, indicando que a consolidação do pó de ferro foi mais efetiva nessa região. Tal fato pode estar relacionado com a taxa de compressibilidade do meio compressor secundário, uma vez que, nesses casos, a parte inferior do molde cerâmico estava posicionada diretamente sobre o container. O gráfico da Figura 6 correlaciona os dados de dureza com densidade relativa das pré-formas, onde se observa uma boa correlação entre as mesmas. A pré-forma que apresentou maior densidade e maior dureza foi a de número 9, porém a mesma apresentou deformação lateral.

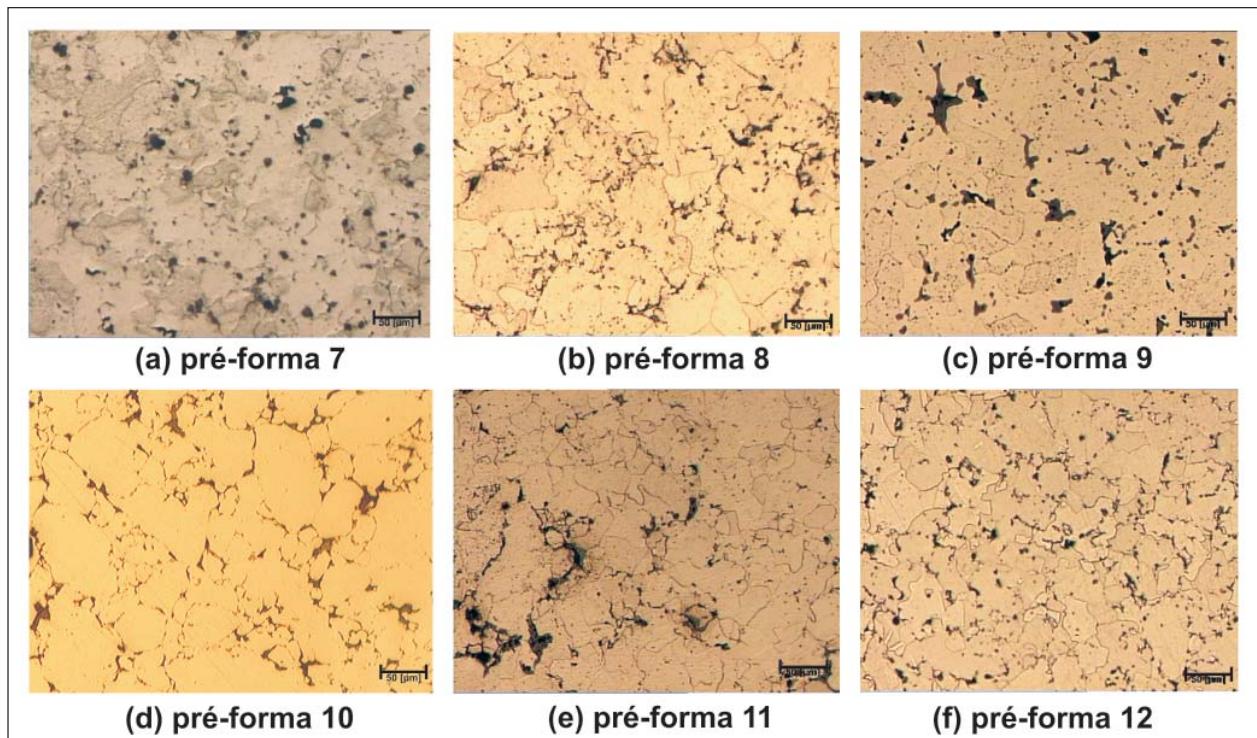


Figura 4 - Micrografias ópticas das pré-formas 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Ataque: Nital 1%.

4. Conclusões

- Os moldes cerâmicos descartáveis produzidos tiveram desempenho adequado para aplicação no processo CCR.
- O pó de argila calcinada apresentou potencial de utilização, pois permitiu alcançar bons níveis de consolidação, não aderindo às paredes do container, sendo de fácil extração, obtenção e baixo custo. Esse meio compressor permitiu obter densidades iguais e até mesmo discretamente acima do indicado pelo fabricante do pôs, se consideradas as pressões utilizadas.
- Observou-se que a configuração do container/meio compressor secundário/molde cerâmico influencia muito nas características dimensionais e de densidade das pré-formas, o que indica a necessidade de realização de um estudo mais detalhado.
- A microestrutura das pré-formas produzidas mostrou que houve consolidação satisfatória dos pôs, mostrando-se compatível com a apresentada na literatura para o pó utilizado. Além disso, não se observou a presença de óxidos de forma acentuada, o que indica que o pó cerâmico utilizado como meio compressor secundário atua, também, como isolante ambiental.
- Observou-se que a dureza na parte inferior da pré-forma foi discretamente maior que a parte superior, indicando que a consolidação do pô de ferro foi mais efetiva nessa região. Observou-se, também, uma boa correlação entre dureza e densidade.

5. Referências bibliográficas

- BOCANEGRA-BERNAL, M. H. Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of Materials Science*, v. 39, n.21, p.6399-6420, 2004.
- ECER, G. (123 Honeycomb Ct., Encinitas, CA, 92024). Method for Preparing Fully Dense, Near-Net-Shaped Objects by

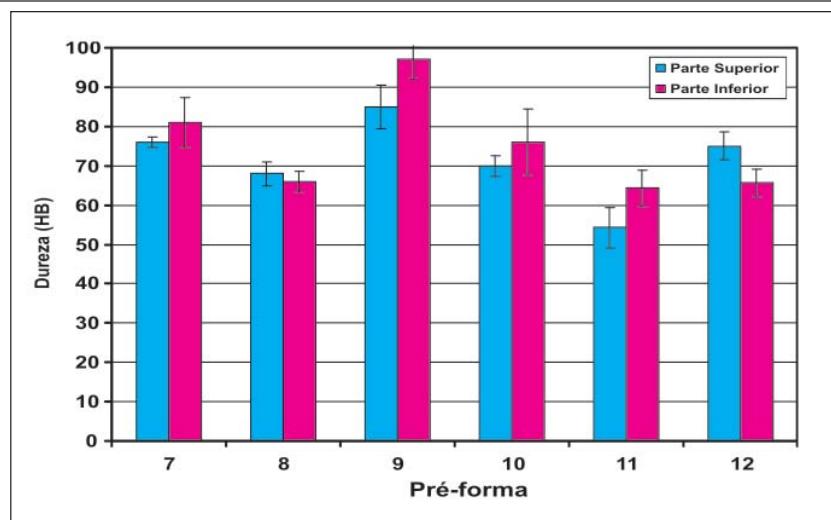


Figura 5 - Valores médios de dureza Brinell na parte superior e inferior das pré-formas.

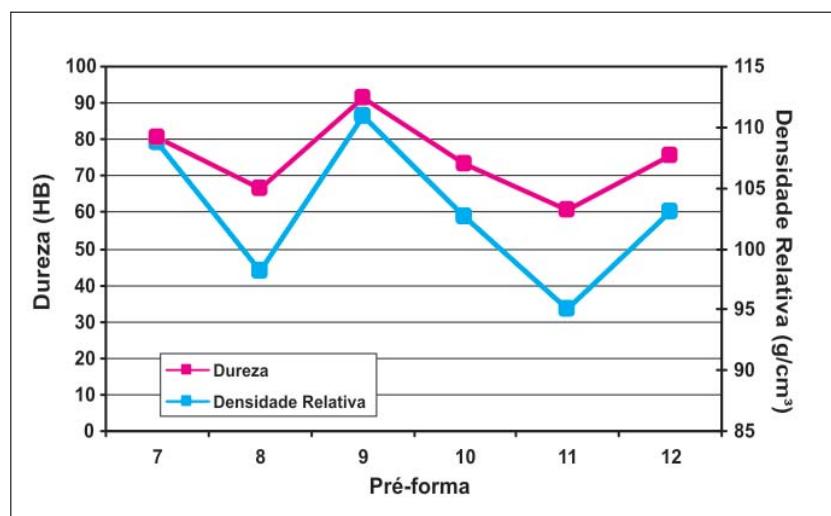


Figura 6 - Correlação entre os valores de dureza com a densidade relativa fornecida pelo fabricante do pô (6,77 g/cm³ a 400MPa).

Powder Metallurgy. United States Patent Number 4.673,549, Primary Class: 419/10, Application Number: 06/836978, Publication Date: 06/16/1987.

ECER, G.M. Radially constricted consolidation. *Advanced Materials and Processes*, v.162, n.11, p.62, Nov., 2004.

FERGUSON, L. *Metals Handbook: Stamp Process*. 9th. v.7, Ohio. ASM, p.547-550, 1984.

FERGUSON, L. Emerging alternatives to hot isostatic pressing. *International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology*, v.21, n.3, p.201-218, 1985.

HÖGANAS. *Manual de pôs de ferro e aço para componentes sinterizados*. Höganäs, 2004.393p.

KIM, K.T, JEON, Y.C. Near-net-shape forming of 316L stainless steel powder under hot isostatic pressing. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.41, p.815-830, 1999.

LOH, N.L., SAI, K.Y. An overview of hot isostatic pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, v.30, n.1, p.45-65, 1992.

Artigo recebido em 08/06/2009 e aprovado em 30/03/2010.