

CERACON<sup>®</sup>: UMA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA

Ricardo Mendes Leal Neto

Paulo Iris Ferreira

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
Caixa Postal 11049 - Pinheiros  
05499 - São Paulo - Brasil

## RESUMO

O termo CERACON (CERAmic CONSolidation) designa um processo de consolidação rápida e completa de pós metálicos e/ou cerâmicos mediante a utilização de um sistema convencional de prensagem. Uma vez que o produto compactado é obtido na sua forma quase final, esta técnica é uma alternativa interessante aos processos tradicionalmente empregados para este fim, como o forjamento e a prensagem isostática a quente. As características do processo CERACON, bem como as vantagens e desvantagens, são apresentadas e discutidas. Um breve levantamento de dados publicados referentes a vários materiais consolidados por esta técnica também é apresentado.

## ABSTRACT

CERACON, acronym for CERAmic CONSolidation, designates a quick way for the complete consolidation of metallic and/or ceramic powders using a conventional pressing apparatus. CERACON is a very powerfull alternative to traditional consolidation processes like forging and hot isostatic pressing, since near-net shape P/M parts can also be produced. In the present work the characteristics of the CERACON process are presented and its advantages and disadvantages are discussed. The result of a brief literature survey concerning the applications of the CERACON process to various materials is also presented.

## 1 - INTRODUÇÃO

O termo Ceracon (Ceramic Consolidation) designa um processo de consolidação rápida de pós metálicos ou cerâmicos, onde uma condição de pressão pseudo-isostática é obtida por meio de um equipamento convencional de prensagem [1-4]. Desde a sua primeira concepção, na década de sessenta [5], este processo vem gradativamente se constituindo numa alternativa à prensagem isostática a quente e ao forjamento de pós, na obtenção de peças na forma próxima à final (near net shape).

A característica principal do processo Ceracon, e que o torna distinto de outros processos alternativos [4], é a utilização de um pó cerâmico como meio transmissor de pressão (MTP). O material a ser consolidado, geralmente um pó encapsulado ou um compactado a frio (pré-forma), é preaquecido e inserido no MTP, também previamente aquecido. O emprego de equipamento convencional de prensagem, como prensas hidráulicas ou mecânicas e matrizes para trabalho a frio, reduz os custos do processo. Uma vez que as pressões envolvidas podem ser elevadas, o tempo de permanência da pré-forma na temperatura desejada é extremamente curto. Isto torna o processo particularmente interessante naqueles casos onde se quer preservar a microestrutura original do material, ou mesmo quando uma exposição longa à temperatura de consolidação danifique irreversivelmente a microestrutura ou prejudique alguma propriedade de interesse. Assim é, que o processo tem-se demonstrado bastante promissor no desenvolvimento de ligas solidificadas rapidamente, cerâmicas supercondutoras, magnetos de elevada força coercitiva, intermetálicos e compósitos [6].

Antes de se passar a uma análise mais detalhada deste processo, far-se-á uma breve descrição dos dois processos mais difundidos, a saber, a prensagem isostática a quente e o forjamento de pós, a fim de que as vantagens e desvantagens da tecnologia Ceracon sejam melhor discernidas.

## 2 - PRENSAGEM ISOSTÁTICA A QUENTE

Na prensagem isostática a quente, o pó solto ou pré-compactado é encapsulado. É fundamental que o material da cápsula se deforme plasticamente sem rompimento nas temperaturas e

pressões envolvidas, bem como não reaja quimicamente e nem se difunda no material sendo consolidado. É mais comum o encapsulamento com chapas metálicas. Empregam-se, geralmente, materiais como o aço-carbono, o aço inoxidável austenítico (304), o titânio comercialmente puro, ou mesmo a liga Ti-6Al-4V [7]. Moldes cerâmicos também podem ser utilizados quando se requer formas complexas com superfícies curvas e reentrâncias. No caso de se optar pela prensagem sem encapsulamento, a porosidade aberta da pré-forma deve ser eliminada. Para tal, a pré-forma deve ser compactada com uma densidade a verde elevada e pré-sinterizada sob vácuo para evitar o aprisionamento de gases. Empregam-se também um recobrimento na superfície para torná-la estanque. Vários métodos podem ser adotados para este fim [7].

Após a evacuação e selagem, a cápsula é introduzida no vaso de pressão. O aquecimento é feito por meio de elementos resistivos internos. O bombeamento de um fluido gasoso, geralmente argônio, transfere a pressão à cápsula. Em razão da isostaticidade da pressão externa, o compactado é densificado de maneira mais uniforme que a verificada em qualquer outro processo. Temperaturas da ordem de 1000 °C a 2000 °C e pressões que vão de 100 a 200 MPa podem ser empregadas conforme o material que se deseja consolidar [8]. Mais de uma peça pode ser compactada por ciclo de operação. Se estiverem encapsuladas, um recipiente ou suporte simples pode ser utilizado para contê-las. Caso contrário elas devem ser suportadas de modo que fiquem separadas uma das outras.

Pode-se obter um compactado isento de porosidade, desde que haja uma combinação adequada de temperatura e pressão. A elevação de pressão e de temperatura pode ser feita de modo independente, ou seja, durante o ciclo operacional a pressão pode ser elevada sem que isso implique em um aumento de temperatura e vice-versa. Características peculiares a cada caso é que determinarão o tipo de ciclo a adotar. O ciclo mais rápido é aquele em que pressão e temperatura são elevadas simultaneamente. Entretanto, ainda assim, o tempo envolvido é de várias horas, pois a pressão máxima é baixa. Isto, além de encarecer o processo, o torna inadequado em alguns casos. Uma outra dificuldade surge da necessidade de remoção da cápsula por meio de usinagem ou ataque químico.

### 3 - FORJAMENTO [9,10]

No forjamento, o pó é compactado a frio e o pré-compactado é sinterizado em atmosfera redutora. A sinterização é necessária para conferir uma resistência mecânica adequada ao forjamento, mediante uma redução substancial do volume de poros e formação de pontes sólidas entre as partículas do pó. A pré-forma é forjada a quente e para tal, seu aquecimento pode ou não fazer parte do próprio ciclo de sinterização. A pré-forma também pode sofrer um recobrimento, que tem por objetivo protegê-la da oxidação quando da sua transferência do forno para a matriz de forjamento, e que também serve como lubrificante. O forjamento é realizado em matriz fechada que também é aquecida (150°C - 300°C) para evitar o coquilhamento da pré-forma. Temperaturas da ordem de 1100°C e pressões de até 1000 MPa podem ser utilizadas. As pré-formas são forjadas numa prensa mecânica, o que implica numa alta velocidade de operação (até 1000 peças por hora).

Há duas linhas de processo distintas: Numa delas, a reprensagem, a pré-forma é consolidada numa forma final de seção transversal bastante similar, densificando-se com pouco ou nenhum escoamento lateral. Na outra linha, o forjamento propriamente dito, uma pré-forma relativamente simples é consolidada numa peça com dimensões significativamente diferentes. Neste caso, ocorre simultaneamente a densificação e a variação de forma por meio de uma deformação plástica e de um escoamento lateral elevados. A ocorrência de escoamento lateral é útil no sentido de promover uma tensão de cisalhamento responsável pela quebra da camada de óxido das partículas e, conseqüentemente, pela melhoria da ligação metalúrgica entre elas. Tem-se constatado que este fenômeno beneficia as propriedades dinâmicas, a saber, a resistência ao impacto e à fadiga. Além disso, a tensão cizalhante permite que a densificação ocorra às custas da diminuição da pressão aplicada. Por outro lado, o escoamento lateral implica num aumento da possibilidade de ocorrência de trincas durante a deformação, o que constitui uma séria dificuldade desta técnica. Assim, a forma e as dimensões da pré-forma devem ser projetadas de modo que a deformação durante o forjamento seja suficiente para atingir a densidade desejada e promover um caldeamento de boa qualidade entre as partículas, porém sem a ocorrência de fratura.

## 4 - CERACON

### 4.1 - Descrição do Processo

O processo é ilustrado no esquema da Fig. 1 [11]. O material de partida pode ser uma peça consolidada por qualquer técnica conveniente associada à metalurgia do pó, como a prensagem uniaxial ou isostática a frio, a moldagem por injeção, e a colagem por barbotina, seguidas ou não de sinterização. Neste caso, não adota-se o encapsulamento, podendo-se entretanto recobrir a pré-forma, o que contribui para evitar a danificação e a intrusão das partículas do pó cerâmico na sua superfície.

O processo, propriamente dito, tem início com o aquecimento da pré-forma, numa atmosfera protetora, até a temperatura de consolidação. Enquanto isso, o meio transmissor de pressão (MTP), ou pó cerâmico, é simultaneamente aquecido à uma temperatura igual ou ligeiramente superior (100°C a 200°C) à da pré-forma. Como opção, a peça fria pode ser carregada na matriz e aquecida pelo próprio meio transmissor de pressão (MTP).

Ambos, pó cerâmico (MTP) e material a compactar, são introduzidos numa camisa metálica, que por sua vez é inserida na cavidade da matriz. O carregamento é iniciado com o pó cerâmico aquecido. A peça é inserida numa posição definida e imediatamente recoberta com o pó cerâmico, o qual deve envolvê-la totalmente, completando-se o carregamento. Várias peças podem ser compactadas simultaneamente, dependendo, é claro, das suas dimensões e da capacidade do ferramental. O tempo de aplicação da carga uniaxial pode variar de poucos segundos a um minuto. Pressões tão elevadas quanto 1240 MPa conjugadas com temperaturas da ordem de 1200°C podem ser empregadas, como no caso da consolidação de pós de alumineto de titânio solidificados rapidamente [11,12].

Após a prensagem, a camisa contendo o MTP e a peça compactada é extraída. O MTP é separado da peça simplesmente entornando-se o recipiente (caso ideal). O pó cerâmico ainda quente é reciclado imediatamente, e o produto é removido para uma estação de resfriamento, após o que, sofre um acabamento final.

Um grau elevado de automatização do sistema é útil para se atingir um bom nível de reprodutibilidade, produtividade e economia do processo. Assim, em sistemas comerciais, o aquecimento da pré-forma e do pó cerâmico, o acionamento da prensa, o carregamento e o posicionamento exato da peça na matriz são todos

automatizados. Além disso, uma série de sensores de movimento, calor e pressão são estrategicamente localizados em toda a linha de produção e interligados com um computador central [2]. O sistema também pode ser operado manualmente, inclusive no que concerne ao carregamento da matriz e ao acionamento da prensa.

#### 4.2 - Aspectos a Considerar

O processo Ceracon tem por objetivo a densificação rápida e completa do material a ser consolidado, na produção de peças com dimensões próximas às finais ("near-net shape"). Para que este intento seja satisfeito de modo eficaz deve-se considerar os seguintes parâmetros:

- pressão e temperatura;
- características do pó cerâmico (MTP);
- dimensionamento da pré-forma.

##### 4.2.1 - Pressão e temperatura

O processo Ceracon é flexível quanto a possíveis combinações de pressão e temperatura que resultam em densificações semelhantes. Um exemplo disso é verificado na Fig. 2 [1], a partir de pré-formas de aço 4650 com 80 % da densidade teórica. Nota-se que o aumento da temperatura causa um aumento da densidade numa determinada pressão, como o esperado. Os aspectos que determinam a combinação adequada estão associados à microestrutura, às propriedades do material consolidado e à economia do processo.

##### 4.2.2 - Características do pó cerâmico

Os aspectos mais fundamentais do processo Ceracon estão, sem dúvida, relacionados ao pó cerâmico utilizado para transferência de pressão à peça compactada. O emprego de materiais como a alumina [3,13], a grafita [14], e mesmo o coque de petróleo [14], tem sido reportados. Independentemente do material que se utilize, certas características devem ser atendidas pelo pó cerâmico [2,3] a fim de que:

- a pressão seja transferida o modo mais uniforme possível ao compactado, minimizando distorções;
- não haja interações químicas com a pré-forma;

- sua recuperação (reciclagem) seja econômica.

O modo pelo qual a pressão é transferida à pré-forma é dependente das características do pó cerâmico que afetam a movimentação e, conseqüentemente, o atrito entre as partículas. Tal movimentação deve ocorrer, necessariamente, durante a prensagem, como resultado da acomodação que o pó cerâmico sofre à medida que a peça é consolidada. No sentido de favorecer uma distribuição homogênea de tensões, a movimentação das partículas deve ser facilitada e o atrito atenuado. Com este propósito, a morfologia, o tamanho e a rugosidade superficial das partículas têm que ser controlados.

Na Fig. 3 [13], observa-se de um modo bem simples como pós morfologicamente diferentes podem afetar a forma originalmente cilíndrica das pré-formas, depois de consolidadas por Ceracon a 100% da densidade teórica. No primeiro caso foi utilizado um pó obtido por trituração e moagem, contendo, portanto, partículas angulosas e irregulares (tipo A). O compactado adquiriu uma forma trapezoidal, uma vez que é grande a diferença de pressão entre a superfície superior, adjacente ao punção móvel, sobre o qual a carga é aplicada, e a superfície inferior, adjacente ao punção fixo. No segundo caso foi utilizado um pó com partículas esféricas (tipo B). Uma vez que as diferenças de pressão entre o topo e a base são atenuadas com este tipo de pó, é possível notar o efeito da pressão lateral que é menor do que a axial. Isto provocou o aumento do diâmetro mostrado na figura, que na realidade deveria se dar mais próximo à base [1]. Por último, obteve-se um cilindro regular com a utilização de um pó como o anterior porém recoberto com grafita (tipo C).

Deve-se ter ainda em mente que no processo Ceracon o compactado sofre, tipicamente, uma contração axial e uma expansão lateral. Tal comportamento também é afetado pela morfologia do pó cerâmico empregado. Na Fig. 4 [1], este fenômeno está exemplificado. Os pontos escuros do gráfico indicam densificação total. Nota-se que com o pó do tipo C (esférico e lubrificado) a densificação total é obtida com uma deformação de -0,2 na altura e de 0,025 no diâmetro. Os pós A (angular) e B (esférico) são menos eficientes na densificação, implicando em outros estados de tensões. Ainda com o pó tipo C, observa-se que deformações além do ponto de máxima densificação podem ser obtidas, porém com alteração da

relação entre a deformação axial e diametral. É interessante notar que, em virtude da deformação diametral ser maior que a radial, há um cisalhamento da pré-forma, durante a consolidação, em menor grau do que aquele verificado no forjamento, porém importante na obtenção de propriedades mecânicas dinâmicas [1].

Morfologia e tamanho de partículas também são importantes no controle do acabamento superficial da peça uma vez que as partículas são pressionadas contra a superfície, atritando-se com ela. Nesse sentido, grãos esféricos são melhores do que grãos angulosos. Partículas maiores, por sua vez, penetram mais profundamente na superfície da peça sendo consolidada do que partículas finas [15], causando maiores dificuldades na sua separação. Por outro lado, partículas muito finas apresentam uma forte tendência à suspensão e à aglomeração, o que causa dificuldades no preenchimento da matriz. A seleção apropriada destas características, conjuntamente com as demais condições de consolidação, permitem evitar a danificação da superfície da pré-forma. Eventualmente, como já mencionado, visando uma maior proteção, a pré-forma pode ser recoberta com um filme de material cerâmico (alumina, magnésia, titânia, zircônia, etc. [3]). Têm-se informações na literatura de faixas granulométricas utilizadas, como por exemplo, de 325 a 100 mesh [15], de 240 a 50 mesh [14], de 140 a 100 mesh [13], e de 200 a 80 mesh [3].

Além das características físicas já mencionadas é fundamental que o pó cerâmico empregado como MTP apresente um comportamento mecânico adequado durante a prensagem [2,3,4]. Isto quer dizer que as partículas devem ter uma resistência mecânica suficientemente elevada, nas condições de temperatura e pressão empregadas, para que não sofram deformação plástica. As partículas cerâmicas, ao se deformarem plasticamente, falham na sua função de transmitir os esforços necessários à consolidação, podendo causar inclusive uma densificação incompleta da peça. Assim requer-se um material cerâmico de alta dureza, tipicamente na faixa de 4000 a 5000 HV à temperatura ambiente [3].

É igualmente necessário que as partículas cerâmicas não se fragmentem durante o processo, a bem da manutenção de suas características morfológicas e granulométricas iniciais, importantes na aplicação uniforme de pressão.

O pó cerâmico e as peças compactadas não devem reagir quimicamente, uma vez que se quer produzir peças com bom

acabamento superficial e ao mesmo tempo evitar a deterioração das partículas cerâmicas.

Do ponto de vista dos fatores relativos ao MTP, que afetam a economicidade do processo, três são os aspectos a considerar [2]. Primeiramente, tem-se o custo envolvido na síntese das partículas cerâmicas com as características desejáveis. Em segundo lugar, está a eficiência da reciclagem dos grãos. Para que ela seja maximizada é necessário que as partículas não se fragmentem no decorrer do processo, seja durante a consolidação, seja durante a ciclagem térmica. É preciso também que não haja sinterização entre as partículas. A baixa sinterabilidade é condição indispensável para que a separação das peças consolidadas e do pó cerâmico seja simples, expedita e não se realize artificialmente às custas da ruptura das partículas. Obviamente, além das características intrínsecas ao pó cerâmico, a sinterização das partículas está condicionada às condições de temperatura e pressão utilizadas. Em terceiro lugar, é necessário que a consolidação das peças seja bem sucedida, entendendo-se que, para isso, as características do pó cerâmico estejam em conformidade com o anteriormente discutido.

#### 4.2.3 - Dimensionamento da pré-forma

As deformações diferenciadas do diâmetro e da altura, que se verificam durante a consolidação, devem servir de base para o dimensionamento da pré-forma, a fim de que as dimensões finais da peça estejam dentro de certos limites preestabelecidos. Tal procedimento é adotado para que se evite um desvio dimensional irremediável, e também em razão da economia de usinagem. Deve-se ter em mente que as deformações supra-citadas são dependentes do meio cerâmico utilizado, da densidade inicial e do tipo do material da pré-forma, além da temperatura e pressão empregadas.

Gradientes de densidade na pré-forma podem conduzir à variações dimensionais na peça consolidada não relacionadas com a qualidade do pó cerâmico ou com prováveis erros de projeto [1]. A reprodutibilidade dimensional também pode ser afetada por variações de temperatura e pressão entre uma e outra peça consolidada. O mesmo pode ser dito com relação ao posicionamento da pré-forma na matriz.

Comparativamente ao forjamento, o projeto da pré-forma não carece de cuidados com relação à formação de trincas durante a consolidação, uma vez que não há fluxo de metal em contato com a

matriz e nem expansão lateral de superfícies livres. Além disso, a densificação, se bem realizada, ocorre de modo mais uniforme e não há regiões de porosidade residual, o que eventualmente acontece no forjamento de pós [1].

## 5 - APLICAÇÕES

Pode-se dizer que o processo Ceracon seria de aplicação ilimitada, quanto ao tipo de material consolidado, se não fossem as restrições impostas nos casos onde não se pode evitar que reações químicas ocorram entre a pré-forma e o MTP ou quando não se dispõe de um MTP adequado às temperaturas necessárias.

Na Tabela 1 procurou-se reunir informações disponíveis na literatura sobre parâmetros de processo empregados na consolidação de alguns materiais. A versatilidade do processo poderá também ser melhor assimilada do exposto a seguir.

### 5.1 - Ligas de alumínio

A maior dificuldade na consolidação de pós de alumínio é fruto da camada superficial de óxido das partículas. Tal camada é flexível e contínua, constituindo-se numa barreira à difusão e prejudicando o caldeamento entre as partículas. O processo Ceracon, no entanto, tem-se mostrado promissor nessa área. Pós da liga 6061 foram consolidados com sucesso por esse processo. Numa comparação com a mesma liga trabalhada (T6), houve um aumento de 5% no limite de escoamento, de 2.6% na resistência à tração, e de 25% no alongamento até a fratura. Além disso, registrou-se um aumento de 500% na ductilidade em relação a um produto sinterizado da mesma liga.

Num estudo posterior com pós da liga 2124 [16] consolidados por Ceracon, comparou-se as propriedades mecânicas obtidas com aquelas da liga trabalhada 2124-T351, obteve-se em média valores similares em relação ao limite de escoamento e à resistência à tração, porém a ductilidade (alongamento) foi 16% menor. Os autores não puderam fazer uma comparação com o mesmo material consolidado por outra técnica, porém acreditam que a ductilidade do material consolidado por Ceracon seria maior. Numa comparação com as propriedades da liga 2214, sinterizada, forjada a quente com 80% de deformação, e tratada termicamente à condição T6, encontra-se uma

dutilidade de 5%, sendo que ela é de 17% com o processo Ceracon.

Resultados promissores em relação à densificação completa de pós de TiAl (34% em peso de Al) solidificados rapidamente também foram obtidos [12]. Isto foi possível graças à aplicação de uma deformação plástica intensa, fruto da altíssima pressão empregada (1.24 GPa) e da presença significativa da fase desordenada  $\alpha$  (Ti). Estudos ainda se fazem necessários porém, para o devido controle da homogeneidade microestrutural.

### 5.2 - Aço 4650

Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração são comparadas na Tabela 2 [2]. Os dados do aço 4650 foram obtidos a partir de pós consolidados por Ceracon. O aço AISI 5150, fundido e trabalhado, representa o material que será substituído na aplicação em questão. Nota-se que as propriedades são similares, com exceção da dutilidade, principalmente no que se refere à redução de área. Peças consolidadas por reprensagem a quente apresentam propriedades mecânicas similares às obtidas por Ceracon.

### 5.3 - Titânio

Estudos realizados com pós de titânio comercialmente puro, consolidados pelo processo Ceracon, evidenciam o papel da tensão de cisalhamento imposta às pré-formas, na melhora das propriedades mecânicas dinâmicas. No gráfico da Fig. 5 [11], onde foram traçadas curvas S-N, nota-se como a resistência à fadiga sob tração evolui com a densidade de compactados de titânio comparativamente ao titânio trabalhado. Nota-se que a amostra consolidada com 99.7% da densidade teórica tem um comportamento bastante semelhante ao do material trabalhado.

### 5.4 - Superligas de Níquel

Na Tabela 3 [2], são apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração de amostras consolidadas pelo processo Ceracon, a partir de pós atomizados da superliga IN 100, em comparação com amostras do mesmo material fundido e trabalhado. Pode-se dizer que mecanicamente os materiais são bastante similares.

### 5.5 - Supercondutores Cerâmicos

A supercondutividade de cerâmicas à base de óxidos de ítrio, bário e cobre é bastante sensível às condições de processamento.

Em particular, a densidade da amostra afeta em grande parte a densidade de corrente crítica  $J_c$  destes materiais. Além disso exposições prolongadas dessas cerâmicas às temperaturas normalmente utilizadas na sinterização podem acarretar na formação de fases não supercondutoras ou mesmo alterar a estequiometria do óxido.

Amostras de  $YBa_2Cu_3O_x$  foram consolidadas pelo processo Ceracon a 96% da densidade teórica, com as vantagens que um processo de consolidação rápida pode oferecer. A densidade de corrente crítica foi aumentada em uma ordem de magnitude, com a manutenção da temperatura de ocorrência de supercondutividade e do nível de impurezas em relação às amostras consolidadas convencionalmente [17].

#### 5.6 - Outros materiais

Além dos materiais anteriormente discutidos, tem-se menção na literatura de alguns outros consolidados segundo a tecnologia Ceracon, como o aço inox 420 [2], o latão 70-30 [2], o aço ferramenta M2 [15], a liga de Ti-6Al-4V [15], os intermetálicos à base de nióbio [18], o alumínio obtido por compactação dinâmica de líquidos [19], os magnetos de Nd-Fe-B [6], e os compósitos de alumínio, alumina, e cobre reforçados com SiC [6].

#### 5.7 - Produção de peças

O processo Ceracon tem capacidade de conformar uma vasta gama de materiais sob formas complexas possuindo seções delgadas, orifícios transversais, ranhuras, rasgos e reentrâncias. Entretanto, como não se utiliza um ferramental rígido, uma vez que a pré-forma é envolvida pelo pó cerâmico, a tolerância dimensional não é maior do que 0,25 mm [4]. Insertos podem ser empregados com vistas a obtenção de tolerâncias mais estreitas. Peças de seção delgada e de comprimento longo podem fletir durante a consolidação, o que implica numa operação posterior de endireitamento [4]. Exemplos de peças consolidadas abrangem ferramentas manuais como chaves ajustáveis e chaves de boca, bielas para motores de combustão interna, engrenagens de dentes retos, cônicos ou helicoidais e artefatos para fechaduras de portas [3].

Do ponto de vista econômico pode-se dizer que há duas classes de produtos em que o processo Ceracon se torna especialmente interessante [2]. Numa delas, as peças são de alto custo, pois envolvem pós de partida de custo elevado, produzidas em pequena

escala, e requerem uma usinagem intensiva. Com o processo Ceracon, há uma economia de material, uma vez que as perdas por usinagem são bastante reduzidas pela possibilidade de se obter peças com um formato próximo ao final. Exemplos englobam peças utilizadas na área médica e aeroespacial. A outra classe é constituída por peças de baixa tolerância dimensional, produzidas em alta escala e a um baixo custo, onde a principal vantagem econômica está na não utilização de um ferramental rígido, como no forjamento, ou caro, como na prensagem isostática a quente.

#### 6 - CONCLUSÃO

O processo Ceracon tem-se firmado, gradativamente, como uma alternativa tecnológica e econômica de consolidação de pós na obtenção de peças completamente densificadas e com dimensões próximas às definitivas.

O controle preciso de variáveis, tais como a densidade da pré-forma, as características do meio transmissor de pressão, o posicionamento da pré-forma na matriz, a temperatura e a pressão de consolidação, é fundamental para a reprodutibilidade dimensional das peças produzidas. Neste sentido, a automatização e a informatização do sistema têm uma contribuição decisiva.

Materiais tradicionalmente de difícil conformação têm sido consolidados com êxito pelo processo Ceracon que, em alguns casos, é empregado com vantagens únicas.

#### BIBLIOGRAFIA

1. KUNH, H. A.; FERGUSON, B. L. & SMITH, O. D. - *Pseudo-hip using conventional presses*, Metal Powder Report, 1983, **38**, (6), 321-323.
2. FERGUSON, B. L.; KUNH, H. A.; SMITH, O. D. & HOFSTATTER, F. - *Hot consolidation of porous preforms using soft tooling*, Int. Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, 1984, **20**, (2), 131-139.
3. FERGUSON, B. L. & SMITH, O. D. - *Ceracon process*, Metal's Handbook, **7**, 9ª ed., 537-541.
4. FERGUSON, B. L. - *Emerging alternatives to hot isostatic pressing*, Metal Powder Report, 1985, **40**, (9), 473-483.

5. HAILEY, R. W. - *Method of producing high density Metallic Products*, US Patent 3356496, Dec. 5, 1967.
6. CHAN, H. W. - *The Ceracon process for p/m technology: a review of recent developments*, *Materials and Design*, 1988, 9, (6), 355-358.
7. PRICE, P. E. & KOHLER, S. P. - *Hot isostatic pressing of metal powders*, *Metal's Handbook*, 7, 9<sup>ed.</sup>, 419-450.
8. FISCHMEISTER, H. - *Isostatic hot compaction*, *Powder Metall. Int.*, 1978, 10, (3), 119-123.
9. KUHN, H. A. & DOWNEY, C. L. - *How flow and fracture affect design of preforms for powder forging*, *Int. J. of Powder Metall. & Powder Tech.*, 1974, 10, (1), 59-66.
10. LEE, P. W. & KUHN, H. A. - *P/M forging*, *Metal's Handbook*, 7, 9<sup>ed.</sup>, 410-418.
11. ANDERSON, R. L. & GROZA, J. - *High speed consolidation of rapidly solidified high temperature powder preforms*, *Metal Powder Report*, 1988, 43, (10), 678-681.
12. LEVI, C. G.; MEHRABIAN, R.; OSLIN, B.; ANDERSON, R. L. & SASTRY, S. M. L. - *Consolidation of rapidly solidified intermetallic powders using the Ceracon process*, *J. Mater. Shaping Technol.*, 1988, 6, (2), 125-132.
13. HANEJKO, F. G. - *Method of consolidating a metallic or ceramic body*, US Patent 4.499.049, Feb., 12, 1985.
14. LICHTI, W. P. & HOFSTATTER, F. - *Method of object consolidation employing graphite particulate*, US Patent 4640711, Feb. 3, 1987.
15. HAILEY, R. W. - *Method of consolidating metallic bodies*, US Patent 3689259, Sept. 5, 1972.
16. CHAN, H. W.; OSLIN, B. L.; SUTHERLAND, T. J.; DUNHAM, D. P. & GIBELING, J. C. - *Ceracon processing of p/m 2124 aluminum: microstructure and tensile properties*, *Int. J. of Powder Metall.*, 1984, 25, (4), 351-355.
17. SHELTON, R. N.; ANDREASEN, D.; KLAVINS, P.; CHAN, H. W.; OSLIN, B. L. & ANDERSON, R. L. - *Microstructure and superconducting properties of high-density consolidated YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>*, *J. Am. Ceram. Soc.*, 1988, 71, (12), C487-C489.
18. *"Rapid consolidation of aluminides"*, *Advanced materials & Process*, 1990, (4), 109-110.
19. *"Ceracon process ready shape the future"*, *Metal Powder Report*, 1988, 43, (4), 272-273.

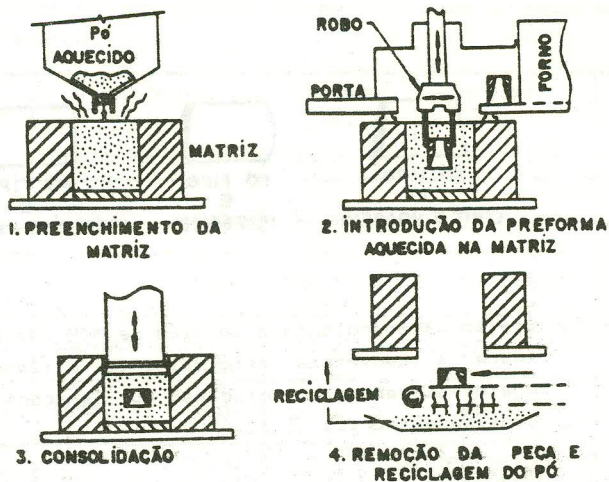


Figura 1 - Etapas do processo Ceracon [11].

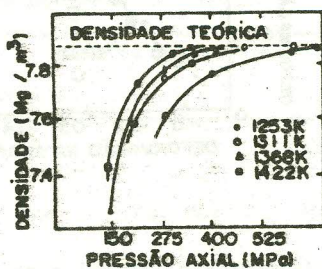


Figura 2 - Variação da densidade de pré-formas de aço 4650 (80% densidade teórica) consolidadas por Ceracon em diferentes pressões e temperaturas [1].



Figura 3 - Efeito da morfologia e do tipo de MTP (pó cerâmico) sobre a geometria originalmente cilíndrica de preformas após a consolidação por Ceracon (100% da densidade teórica) [13].

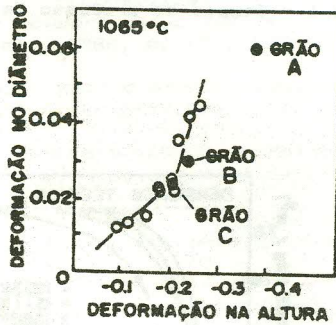


Figura 4 - Variação da expansão lateral e da tração axial, quando se emprega o pó do tipo C, antes e depois da densificação total, simbolizada pelo círculo cheio (●). Os pontos relativos à densificação plena obtida com os pós do tipo A e B também estão indicados [1].

TABELA 1 - Dados de processo de alguns materiais consolidados por Ceracon.

Material Consolidado ( PTM )	Temperatura ( °C )		Pressão ( MPa ) Tempo ( s )	Densidade ( % $\rho_t$ ) inic./final	Ref.
	Preforma	PTM			
Aço 4650 ( Alumina )	1065	n.c.	441 / n.c.	80 / 100	3, 4
Aço M-2 ( Alumina )	1250	1000	540 / 15	75 / 100	15
Al 2124 ( n.c. )	500-600	n.c.	1240 / n.c.	92 / 100	16
Ti-6Al-4V ( Alumina )	1000	1000	540 / 15	65 / 100	15
TiAl ( Grafite )	1200 1300	1400 1500	1240 / 45	Pó solto / 100	12
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub> ( n.c. )	n.c.	950	830 / 30 40	67 / 96	17

TABELA 2 - Propriedades mecânicas de compactados de aço A4650V consolidados por Ceracon \* [2].

Resultados do Ensaio de Tração				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	AISI 5150
Limite de Escoamento	1255 MPa	1413 MPa	1282 Mpa	1276 Mpa
Resistência à Tração	1407 Mpa	1403 Mpa	1400 Mpa	1351 MPa
Alongamento Uniforme	4,1 %	4,1 %	4,1 %	--
Alongamento Total	10,6 %	9,0 %	6,2 %	12 %
Redução de Área	22,8 %	22,6 %	21,9 % ,	46 %

\* Amostras tratadas termicamente (41 a 43 Rc)

- TITÂNIO TRABALHADO  
 ▼ PÓ DE TITÂNIO PENSADO POR CERAÇON-997% D.T.  
 ▲ COMPACTADO DE TITÂNIO-96% D.T.  
 ■ COMPACTADO DE TITÂNIO-93,7% D.T.  
 ● COMPACTADO DE TITÂNIO-89% D.T.
- R=0,1  
 PRÉ-CARGA=10%

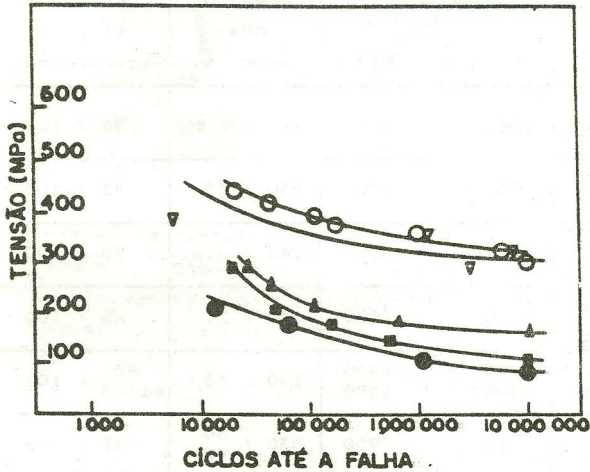


Figura 5 - Curvas S-N de amostras de Ti comercialmente puro trabalhadas e compactadas [11].

TABELA 3 - Propriedades mecânicas de pré-formas da liga IN 100\*, sinterizadas e consolidadas por Ceracon [2].

	Amostra 1	Amostra 2	IN 100 (fundida e trabalhada)
Limite de Escoamento	758 MPa	759 MPa	848 MPa
Resistência à Tração	1217 MPa	1049 MPa	1014 MPa
Alongamento Total	12 %	6 %	9 %
Redução de Área	11,7 %	6,3 %	- -

\* Recozidas a 1093°C (4 horas) e envelhecidas a 246°C (24 horas)