

RENATO NAZÁRIO IDE

**EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO NA DENSIDADE A VERDE  
APÓS COMPACTAÇÃO A MORNO DE PÓ DE FERRO**

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Departamento de Engenharia Metalúrgica  
e de Materiais da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

**SÃO PAULO**

**2007**

RENATO NAZÁRIO IDE

**EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO NA DENSIDADE A VERDE  
APÓS COMPACTAÇÃO A MORNO DE PÓ DE FERRO**

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Departamento de Engenharia Metalúrgica  
e de Materiais da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração: Engenharia de  
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Fernando José  
Gomes Landgraf

**SÃO PAULO**  
**2007**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Ide, Renato Nazario**

**Efeitos da temperatura e pressão na densidade a verde após compactação a morno de pó de ferro / R. N. Ide. -- São Paulo, 2007.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.**

**1. Metalurgia do Pó 2. Compactação a morno 3. Warm Compaction 4. Densidade a verde  
Metalurgia do pó I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.**

## Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à minha família, que me deu base, suporte e condições de chegar e concluir mais esta etapa. Que estiveram ao meu lado independente das adversidades encontradas.

Agradeço também ao Professor Fernando Landgraff por ter me orientado neste trabalho e me ajudar com os contatos necessários para realizar os experimentos.

Devo também agradecer aos técnicos dos laboratórios que utilizei assim como todas as pessoas que me auxiliaram de alguma forma a elaborar este trabalho

Finalmente agradeço a minha namorada Carol, não só por suportar e entender minhas ausências, necessárias para finalizar este trabalho assim como todos os deveres acadêmicos, mas também pelo incentivo dado.

Aos amigos peço desculpas pelas ausências e agradeço por todos os momentos divertidos que não serão esquecidos.

Obrigado a todos.

## Resumo

Na busca por alternativas mais baratas de produzir peças de alta densidade utilizando a metalurgia do pó em seu processo tradicional (compactação do pó e sua sinterização) chegou-se à compactação a morno, que possui esse nome por utilizar temperaturas mais baixas, se comparadas aos demais processos metalúrgicos, no entanto mais altas que a temperatura ambiente.

Este processo beneficia-se da considerável queda da tensão de escoamento do material ao ser levemente aquecido, de modo que as forças aplicadas durante a compactação podem causar uma deformação plástica maior no metal e só recentemente passou a se desenvolver devido às evoluções dos lubrificantes utilizados também, que agora resistem às temperaturas envolvidas.

O processo mostra-se muito interessante comercialmente, tanto que seu crescimento foi constante desde sua implantação industrial em meados dos anos 90, atingindo densidades compatíveis com as alcançadas por processos muito mais dispendiosos.

Os resultados obtidos por este trabalho condizem com as pesquisas desenvolvidas ao redor do mundo, mostrando, a partir de uma curva de compressibilidade, que as densidades a verde obtidas com o pó e a ferramenta aquecidos são significativamente maiores que às obtidas com o processo a temperatura ambiente.



## Abstract

By looking for new methods of producing high density parts using the traditional method of powder metallurgy, the warm compaction process was found. This name is due to the use of lower temperatures if compared to other metallurgical process but higher than room temperature.

This process takes advantage of the fact that moderate increases at temperature cause significant drop on the yield strength. As a result, for the same pressure applied to the cold powder, the warm one will show greater plastic deformation. The process only became possible recently because of the lubricants involved in the process, which were not able to resist to the temperatures involved.

Industrially the process showed to be very interesting, so much that since its introduction the industries are adopting it quickly for achieving densities that can be compared to more expensive process.

The results obtained at this study show clearly the increase of green density when the powder is compacted using heat.

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Análise bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
2.1. <i>Metalurgia do pó e suas vantagens.....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>Warm Compaction.....</i>	<i>9</i>
2.3. <i>Lubrificantes.....</i>	<i>12</i>
2.4. <i>Compressibilidade.....</i>	<i>14</i>
2.5. <i>Pore Free Density.....</i>	<i>14</i>
<b>3. Objetivos, Materiais e Procedimento experimental.....</b>	<b>16</b>
3.1. <i>Objetivos.....</i>	<i>16</i>
3.2. <i>Materiais.....</i>	<i>17</i>
3.3. <i>Curvas de Compressibilidade.....</i>	<i>17</i>
3.4. <i>Determinação das Densidades a Verde.....</i>	<i>20</i>
<b>4. Resultados e Discussões.....</b>	<b>26</b>
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>31</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>32</b>

## Índice de Ilustrações

<u>Figura 1 – Comparativo de custo por peças entre usinagem e metalurgia do pó.....</u>	5
<u>Figura 2 – Utilização da metalurgia do pó.....</u>	6
<u>Figura 3 – Comparação das etapas produtivas entre o processo tradicional de metalurgia do pó e warm compaction.....</u>	8
<u>Figura 4 – Exemplo de peça que se aproveitou dos menores custos da metalurgia do pó para sem confeccionada. Conversor de torque de transmissão.....</u>	9
<u>Figura 5 – Corpos de prova utilizados para determinar a curva de compressibilidade.....</u>	18
<u>Figura 6 – Matriz.....</u>	20
<u>Figura 7 – Forno utilizado para aquecer as amostras de pó e a matriz.....</u>	21
<u>Figura 8 – Prensa de 30 toneladas de capacidade utilizada durante os ensaios.....</u>	22
<u>Figura 9 – Prensa utilizada para pré-compactação (capacidade 10 toneladas).....</u>	23
<u>Figura 10 – Forno utilizado para aquecer o pó e a matriz.....</u>	23
<u>Figura 11 – Presa utilizada para compactar as amostras com 700 MPa.....</u>	24
<u>Figura 12 – Ilustração dos corpos de prova produzidos.....</u>	24
<u>Figura 13 – Calculo da densidade.....</u>	25
<u>Figura 14 – Ilustração de pesagem dos corpos de prova.....</u>	26
<u>Gráfico 1 – Comparação entre as densidades obtidas por diferentes processos.....</u>	7
<u>Gráfico 2 – Efeito da temperatura sobre a tensão de escoamento.....</u>	10
<u>Gráfico 3 – Comparação entre a deformação conseguida para uma mesma tensão aplicada no pó frio e no pó aquecido.....</u>	11
<u>Gráfico 4 – Comparação da densidade em função da quantidade de lubrificante adicionado à mistura de pós.....</u>	13
<u>Gráfico 5 – Curvas de Compressibilidade do pó metálico FC-0208.....</u>	19
<u>Gráfico 6 – Curvas de Compressibilidade do pó metálico FLC-4608.....</u>	19
<u>Gráfico 7 – Gráfico de comparação entre a curva de compressibilidade do pó FC 0208 e as densidade obtidas experimentalmente.....</u>	29
<u>Gráfico 8 - Gráfico de comparação entre a curva de compressibilidade do pó FLC 4608 e as densidade obtidas experimentalmente.....</u>	30

Índice de tabelas

<u>Tabela 1 – Breve histórico da metalurgia do pó.....</u>	<u>2</u>
<u>Tabela 2 – Aplicações da metalurgia do pó.....</u>	<u>6</u>
<u>Tabela 3 – Composição química do pó FC-0208.....</u>	<u>17</u>
<u>Tabela 4 – Composição química do pó FLC-4608.....</u>	<u>17</u>
<u>Tabela 5 – Densidades para obtidas para o material FC-0208.....</u>	<u>27</u>
<u>Tabela 6 - Densidades para obtidas para o material FLC-4608.....</u>	<u>27</u>

## 1. Introdução

Os primeiros registros da utilização da metalurgia do pó pela humanidade datam de 3000 a.c. na fabricação de uma espécie de esponja de ferro utilizada na fabricação de ferramentas, onde óxido de ferro era reduzido a ferro metálico através da utilização de fornos rudimentares e o pó obtido era martelado para dar origem à ferramentas.

No entanto, este ramo da metalurgia chegou a ser considerado uma arte perdida, pois não fora utilizada propriamente até meados do século 18, data a partir da qual se registram vários métodos para a produção de artefatos de platina.

Atualmente relacionamos mais comumente a metalurgia do pó com a produção de peças para automóveis ou pra maquinários em geral. No entanto muitos registros ligam esse processo à produção de artefatos decorativos, como base para tintas e cosméticos ou mesmo pó de ouro na ilustração de manuscritos.

O uso destes metais nobres nos primórdios da manipulação dos pós metálicos não é por acaso, já que como não havia controle de oxidação, acredita-se que os pós eram obtidos a partir do estado líquido de metais de baixo ponto de fusão e resistentes à oxidação. A utilização destes ocorria primeiramente sob a forma de pó mesmo, não caracterizando a metalurgia do pó propriamente dita que passa pelo processo de sinterização. No entanto, posteriormente foi descoberto que martelando com força suficiente as partículas metálicas era possível agregá-las de modo a confeccionar ferramentas e utensílios, moldados posteriormente pelos métodos tradicionais de usinagem da época.

Os processos envolvendo a metalurgia do pó evoluíram com a humanidade, passando pelos Incas na época anterior ao descobrimento das Américas por Colombo. No entanto, apenas em 1829 os processos começaram a utilizar as bases da atual metalurgia do pó.

Continuando a história, no fim do século 19 teve início a produção de filamentos de tungstênio para lâmpadas, processo que dura até hoje, e posteriormente a produção de metais porosos, a utilização de lubrificantes e, mais recentemente, a evolução dos métodos de compactação e sinterização.

A tabela a seguir faz traz uma breve noção da história do processo.

Tabela 1 – Breve histórico da metalurgia do pó

<b>EPOCA</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E ORIGEM</b>
3.000 A.C.	Ferro-esponja para ferramentas - Egito, África e Índia
1.200 D.C.	Grãos de platina cimentados - América do Sul (Incas)
1781	Liga platina-arsênio - França, Alemanha
1790	Produção comercial de recipientes químicos de platina-arsênio - França
1822	Produção de pó de platina conformado em lingotes - França
1826	Sinterização a alta temperatura de compactados de pó de platina - Rússia
1829	Método Wollaston de fabricação de compactados de platina, a partir de platina esponjosa (base da moderna metalurgia do pó) - Grã-Bretanha
1830	Sinterização de compactados de vários pós metálicos - Europa
1870	Patente para materiais de mancais produzidos a partir de pós metálicos (precursores das buchas autolubrificantes) - EUA
Início do século 20	Coolidge desenvolve processo para produção de filamentos de lâmpadas incandescentes - EUA
Início do século 20	Metais compostos - EUA
Decênio 1920	Mancais autolubrificantes e filtros metálicos - EUA
Decênio 1920	Escovas coletoras cobre-grafita - EUA
Decênio 1920	Contatos elétricos - EUA
1920-decênio 1930	Materiais de fricção - EUA
1920-decênio 1930	Metal duro (carboneto de tungstênio sintenzado) - Alemanha
Decênio 1930	Modemos Cermets - EUA
Decênio 1940	Tecnologia do pó de ferro - EUA
1960 em diante	Materiais metálicos de alta densidade via forjamento do pó - EUA
1970 em diante	Ligas especiais, compactação isostática a quente, aços para ferramentas sintetizados, etc. - EUA
1980 em diante	Técnicas de solidificação rápida e tecnologia de moldagem por injeção - EUA
1990 em diante	Pós nanométricos, "spray forming", e compactação morno, entre outros.

Estes últimos avanços foram resultado da necessidade de produzir peças de melhor qualidade e maior densidade de modo a aproveitar melhor os benefícios da metalurgia do pó, benefícios esse que serão discutidos posteriormente neste trabalho.

Seguindo a evolução do processo, foi no século 20 que os avanços mais significativos ocorreram, com a tecnologia de utilização de pó de ferro, compactação isostática e compactação a quente.

Com o aumento da temperatura na compactação consegue-se uma maior densidade a verde e conseqüentemente uma maior densidade após a sinterização também.

Outro processo desenvolvido foi o de dupla compactação e dupla sinterização, que permitiu alcançar densidades consideravelmente elevadas.

Apenas entre o fim da década de 80 e início da de 90 que a compactação a morno começou a ser utilizada, processo o qual possibilitou atingir densidades próximas do processo de dupla compactação e dupla sinterização utilizando muito menos energia e, assim, com custos menores. Isso só se tornou possível graças ao desenvolvimento de lubrificantes que não se degradam sob as temperaturas envolvidas.

Posteriormente as diferentes técnicas foram utilizadas em conjunto, independente da sua viabilidade econômica. Temos como exemplo o uso da compactação a morno aliada à dupla compactação e dupla sinterização.

Este estudo visa avaliar a influência da temperatura e da pressão na densidade à verde na compactação à morno de dois pós com base de ferro, sendo um deles elementar e outro pré-ligado.

## 2. Análise bibliográfica

### 2.1. Metalurgia do pó e suas vantagens

A metalurgia do pó é um processo no qual se consegue tanto peças de baixa como de altas densidades a preços mais competitivos. Este é o fator mais importante, pois torna o processo viável e assim atrai mais investimento para o seu desenvolvimento, sem contar na economia gerada pelas indústrias.

Em relação ao processo em si, a matéria prima utilizada é uma mistura de pós metálicos, que prensados em uma matriz fechada, geram formas que podem assumir diferentes formatos, dos mais simples a outras de grande complexidade.

As peças obtidas não apresentam as propriedades mecânicas desejadas pelas indústrias apenas após a compactação. Deste modo um segundo processo é necessário, no qual as peças são submetidas a elevadas temperaturas, porém abaixo do ponto de fusão do material, por um determinado período de tempo de modo a obter-se assim a ligação metalúrgica entre as partículas.

Uma característica muito interessante do ponto de vista econômico é o grande aproveitamento da matéria prima empregada inicialmente, o qual fica acima de 95%, fator o qual está relacionado também a outra característica do processo da metalurgia do pó, que é o de produzir peças com geometria muito próximas à final, de modo que em muitos casos a necessidade de usinagem é mínima ou nula. Além disso, graças à minimização das perdas de matéria prima em relação às etapas iniciais e finais de produção, a metalurgia do pó é considerada um processo ecológico, pois ainda permite a reciclagem completa de seus produtos.

Diversas outras vantagens sobre os outros processos metalúrgicos são marcantes, como o excelente acabamento superficial das peças sem necessidade de retífica e flexibilidade na composição das ligas utilizadas.

Merece destaque também a possibilidade de um controle rigoroso das dimensões das peças, sendo muito superior aos processos de forjamento e fundição ainda podendo atingir os mesmos patamares de resistência mecânica de componentes forjados e/ou usinados. Ainda no quesito tolerância dimensional, um forte concorrente são as peças de plástico. No entanto não apresentam resistência mecânica muito inferior às peças metálicas.

Todas essas vantagens geram menores custos, destacando ainda mais as vantagens econômicas da metalurgia do pó que, tem nesse quesito a sua maior vantagem sobre o seu maior concorrente, a usinagem.

Apesar de produzir peças com grande resistência mecânica elevada precisão dimensional a metalurgia do pó garante sua maior competitividade devido aos menores custos envolvidos graças ao aproveitamento da matéria prima e redução do número de etapas de fabricação.

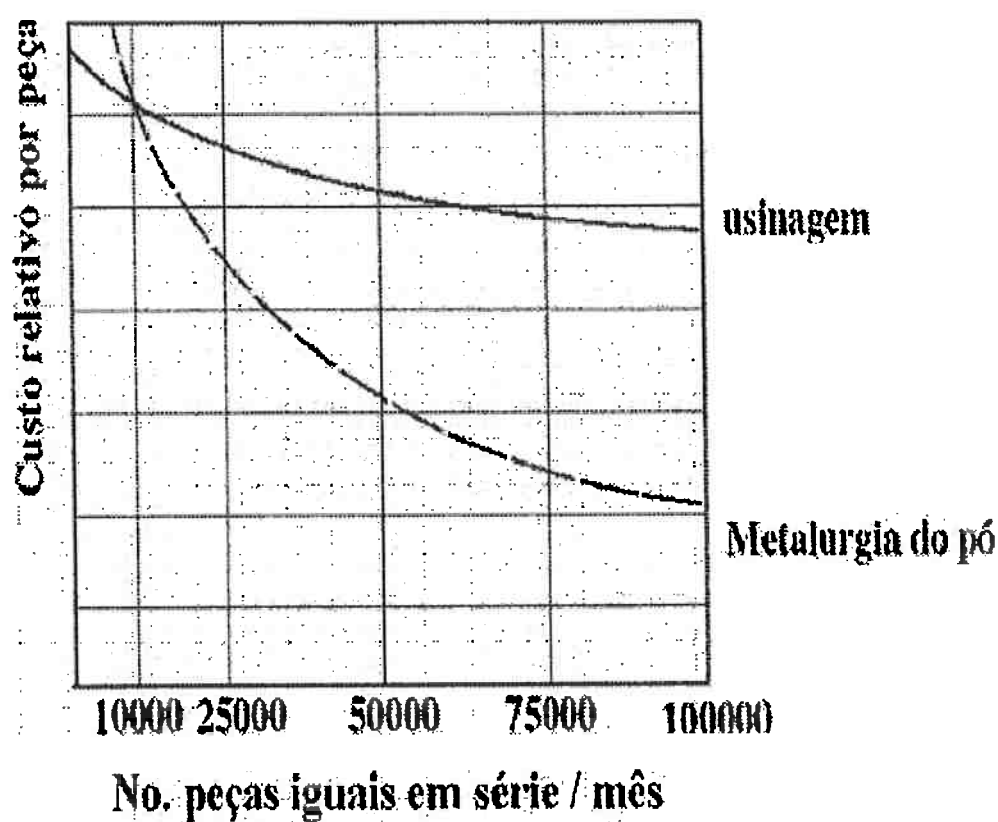


Figura 15 – Comparativo de custo por peças entre usinagem e metalurgia do pó

Um reflexo claro dessa vantagem econômica é o crescimento do processo como resultado das pressões da indústria automobilística por reduções de custo, uma vez que esta é o setor que mais utiliza peças confeccionadas através da manipulação de pós metálicos. Cerca de 70% da produção mundial destina-se a esse mercado.

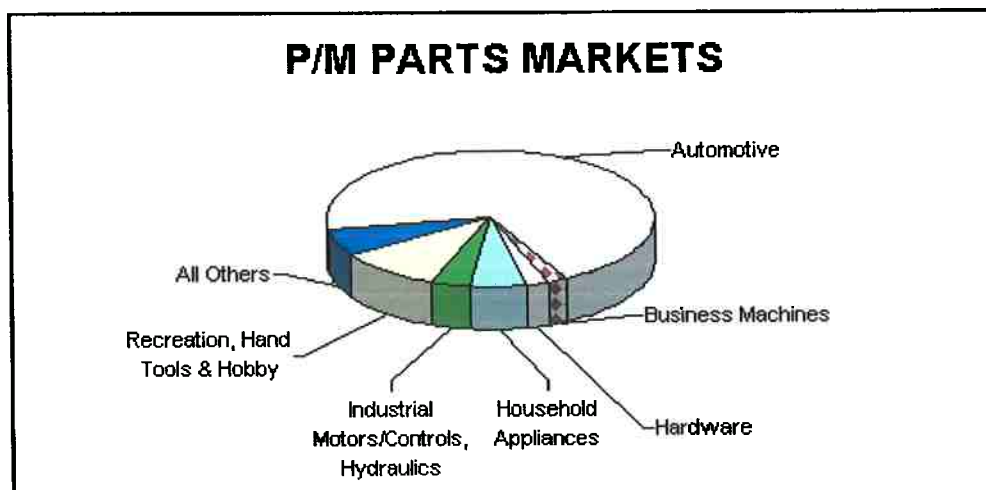


Figura 16 – Utilização da metalurgia do pó

Existem também alguns materiais que só podem ser produzidos através de utilização do processo de compactação e sinterização de pós metálicos devido a suas propriedades físicas e/ou químicas, como na produção de materiais porosos, metal duro ou materiais refratários. Segue uma tabela com os produtos fabricados por metalurgia do pó.

PRODUTOS	APLICACOES	MATERIAL	PROPRIEDADES
Peças estruturais	<ul style="list-style-type: none"> <li>veículos motorizados</li> <li>veículos ferroviários</li> <li>eletrodomésticos</li> <li>máquinas agrícolas</li> <li>mecânica fina - máquina de escrever e de calcular, fotocopiadoras e computadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligas de Fe puro</li> <li>Fe-Cu-Ni</li> <li>Fe-Cu-Ni-Mo e Fe-Cu-P</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>boa resistência mecânica</li> </ul>
Peças porosas	<ul style="list-style-type: none"> <li>filtros metálicos</li> <li>mancais e buchas autolubrificantes</li> <li>condensadores</li> <li>próteses para uso medicinal</li> <li>eletrodomésticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligas de Cu e Ni</li> <li>Ligas ferrosas inoxidáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alta tensão de capilaridade</li> </ul>
Materiais refratários	<ul style="list-style-type: none"> <li>indústrias bélicas e nuclear</li> <li>filamentos de lâmpadas</li> <li>resistência de fornos</li> <li>proteções contra radiação</li> <li>ferramentas antivibratórias</li> <li>lâminas para turbinas a vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligas de W-Mo, Nb e Ta</li> <li>Ligas de W com adições de Cu, Ni e Fe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alta resistência mecânica em temperaturas elevadas e à corrosão</li> <li>alto ponto de fusão</li> <li>capacidade de absorver radiações</li> </ul>
Materiais de fricção	<ul style="list-style-type: none"> <li>freios e embreagens para veículos automotivos e aviões</li> <li>peças para barcos, guindastes, locomotivas, máquinas industriais e motores elétricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligas de Cu e Fe-Cu com adições de SiC, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alto coeficiente de fricção</li> <li>boa resistência mecânica e ao desgaste</li> <li>boa condutividade térmica</li> </ul>
Contactos elétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>reguladores de voltagem</li> <li>interruptores de ignição</li> <li>relés, disjuntores e contactores elétricos</li> <li>peças para indústria automobilística</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligas de Ag e W puros</li> <li>Ligas Ag-W, Ag-WC</li> <li>Ag-Ni, Cu-W e Cu-WC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>boa resistência mecânica</li> <li>boa condutividade elétrica e térmica</li> </ul>
Metal duro	<ul style="list-style-type: none"> <li>ferramentas para mineração e perfuração</li> <li>ferramentas para laminação, trafilção e extrusão</li> <li>matrizes e punções para forja, estampagem, corte e compactação de pós</li> <li>Insertos para fresa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liga WC-Co</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>elevada dureza e resistência ao desgaste</li> <li>boa resistência mecânica</li> <li>alto ponto de fusão</li> </ul>

Tabela 2 – Aplicações da metalurgia do pó

Com o aumento da utilização da metalurgia do pó e comprovação das suas vantagens, passou-se a investir e desenvolver novas técnicas para todas as etapas do processo produtivo tendo como objetivo aumentar a densidade das peças sem reduzir a produtividade.

Assim, passou-se da compactação a frio para a compactação a quente, utilizando temperaturas da ordem de centenas de graus Celsius, de modo que lubrificantes à base de polímero não surtiriam efeito pois degradariam rapidamente.

As densidades alcançadas por este processo envolvendo altas temperaturas são consideravelmente mais altas que no processo sem aquecimento, no entanto os gastos de energia são muito grandes.

Outro método desenvolvido foi o de dupla compactação e dupla sinterização, onde o pó é pré-compactado e passa por uma primeira sinterização para depois ser novamente compactado e sinterizado. Este processo proporciona densidades altas, porém necessita de muitas etapas produtivas, aumentando o tempo de produção de peças e, conseqüentemente, aumentando os custos.

Uma técnica utilizada para manter baixos os custos foi a compactação a morno (Warm Compaction), que alia menos etapas produtivas com menor gasto total de energia par produzir peças de altas densidades.

Nota-se no gráfico abaixo que a compactação a morno atinge densidades próximas das obtidas com temperaturas ambiente mas utilizando dupla compactação e dupla sinterização.

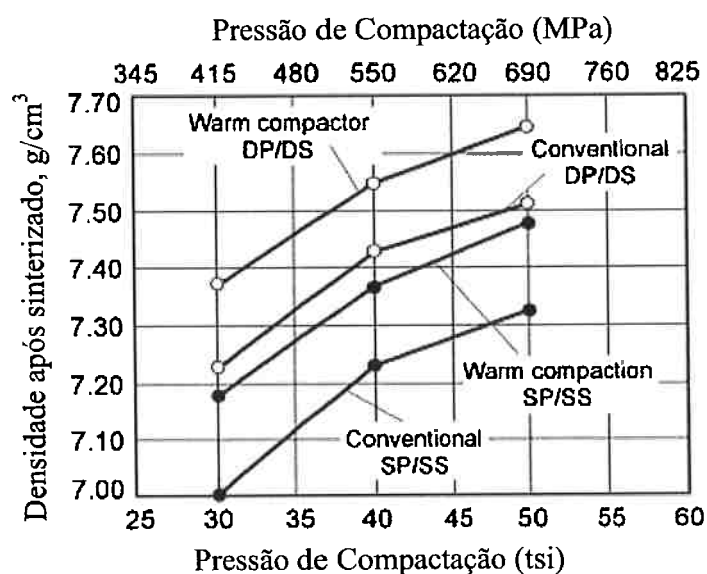
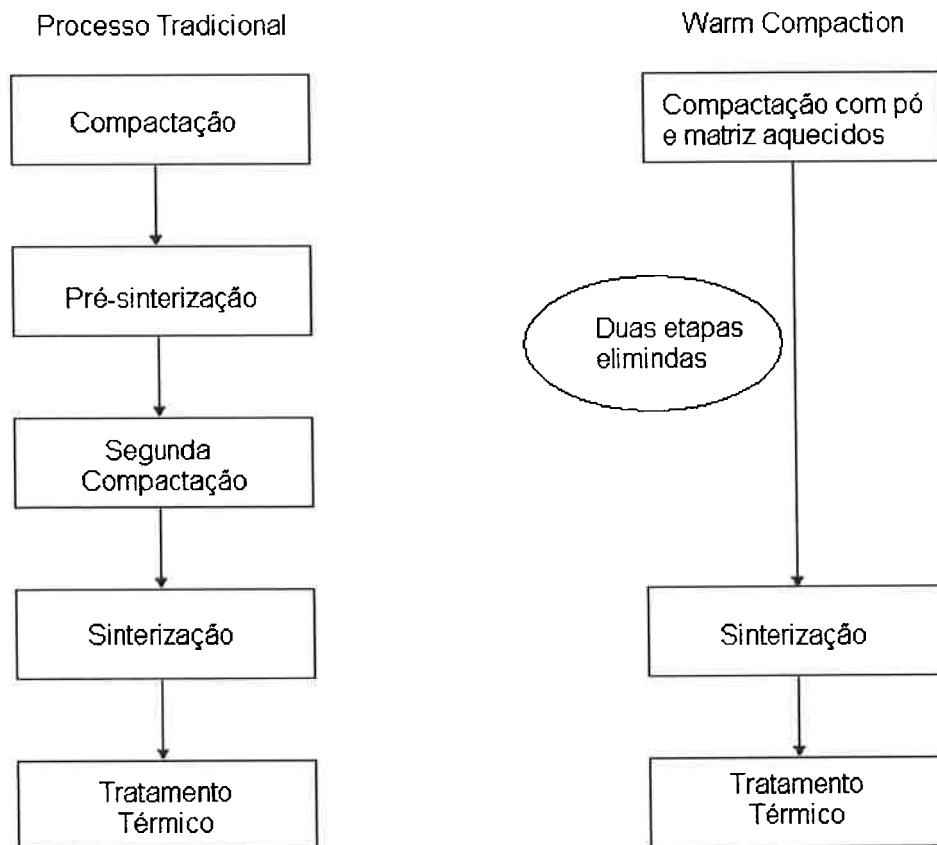


Gráfico 9 – Comparação entre as densidades obtidas por diferentes processos

A figura abaixo faz uma comparação entre a quantidade de etapas envolvidas em um processo tradicional de metalurgia do pó para conseguirem-se altas densidades e o processo de compactação a morno.



**Figura 17 – Comparação das etapas produtivas entre o processo tradicional de metalurgia do pó e warm compaction**

Observando o gráfico 1 e a figura 3 nota-se que a compactação a morno consegue densidades muito próximas dos valores obtidos com temperaturas ambientes porém com menos etapas produtivas. Assim sendo o custo por peça cai e a velocidade de produção é aumentada.

## 2.2. Warm compaction

Tirando vantagem do fato de que aquecendo-se pó e o ferramental consegue-se valores maiores de densidades a verde, a compactação a morno começou a ser utilizada na década de 90 como técnica para redução de custos na produção de peças de alta densidade.

Mais recentemente, a redução de custos na época foi necessária para a sobrevivência das indústrias ligadas ao setor automobilístico, uma vez que enfrentavam

aumento de preços das matérias primas tradicionais até então. Apesar disso, a demanda por peças de maior qualidade continuou a crescer. Tirando proveito disso o processo passou a ser cada vez mais aplicado, de modo que atualmente é o um dos principais métodos para se obter peças de alta resistência mecânica.

A base da técnica está fundamentada no fato de que aumentos moderados na temperatura influenciam consideravelmente a tensão de escoamento do pó metálico, como pode ser observado no gráfico XX.

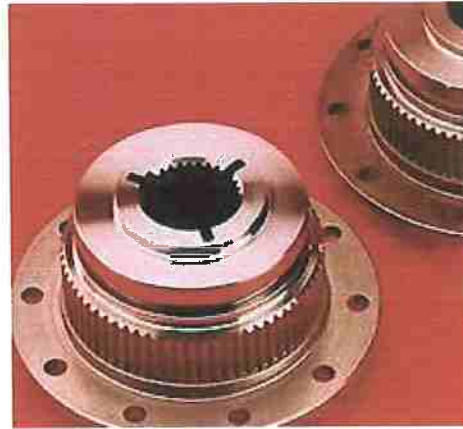


Figura 18 – Exemplo de peça que se aproveitou dos menores custos da metalurgia do pó para ser confeccionada. Conversor de torque de transmissão

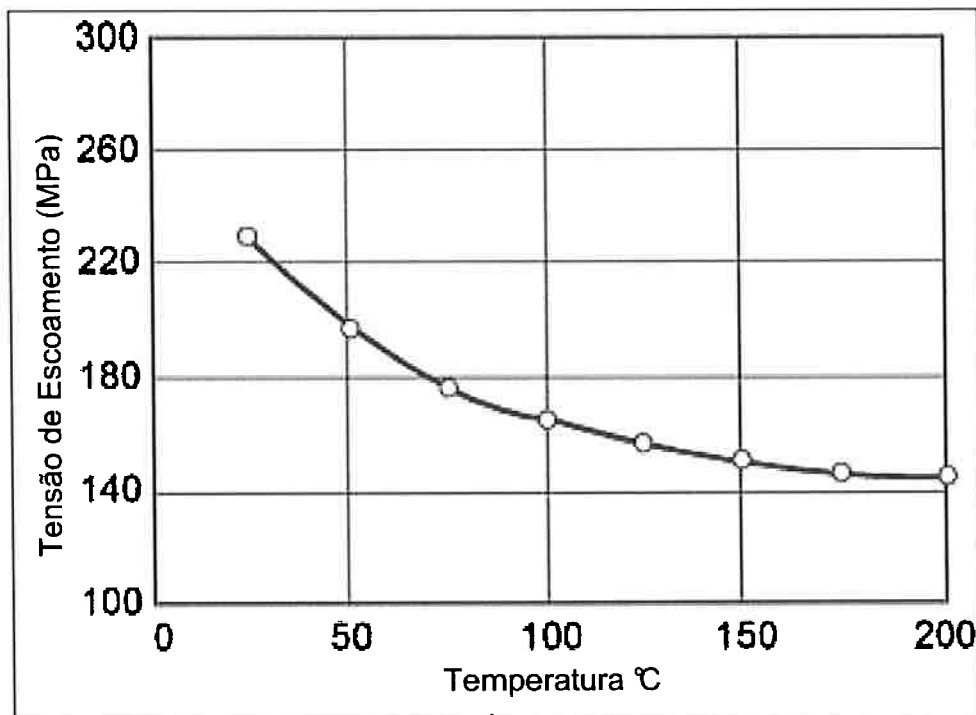
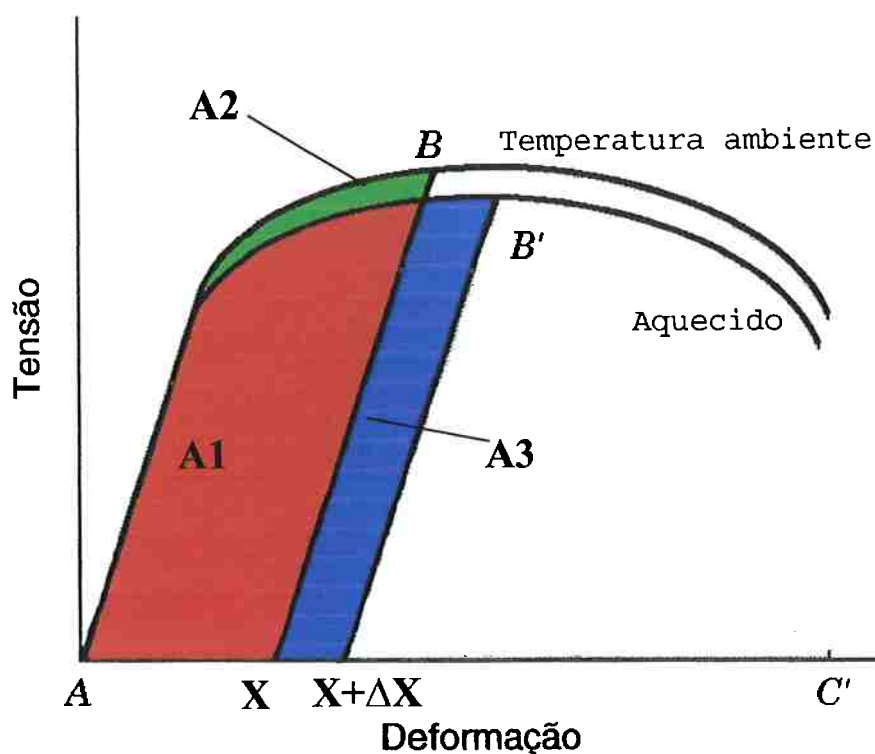


Gráfico 10 - Efeito da temperatura sobre a tensão de escoamento

Isso ocorre porque a deformação de metais pode ser considerada um processo termicamente ativado, onde tanto as deformações elástica, reversível, e plástica, irreversível, são afetadas [1]. Deste modo, com um leve aquecimento do pó envolvido no processo consegue-se uma maior deformação plástica e, conseqüentemente, maiores valores de densidade a verde, pois a uma mesma quantidade de massa estará ocupando um volume menor.

Levando em conta este fenômeno, pode-se concluir que maiores densidades podem ser atingidas com elevadas temperaturas. Todavia, para grandes aquecimentos gasta-se muita energia, aumentando os custos do processo e fugindo do controle de custos proposto pela compactação utilizando temperaturas mais brandas.



**Gráfico 11 – Comparação entre a deformação conseguida para uma mesma tensão aplicada no pó frio e no pó aquecido**

As curvas acima, exageradas para mostrar a diferença de deformação entre o pó aquecido e a temperatura ambiente, ilustram como uma menor tensão de escoamento influencia no processo de compactação e na densidade a verde final aumentando a compressibilidade do material ao permitir uma maior deformação plástica.

Todavia, somente o aquecimento do pó e da matriz não são suficientes para que a compactação a momo funcione devidamente. Outro fator de grande importância para o processo diz respeito aos lubrificantes.

### 2.3. Lubrificantes

Na compactação a quente, os lubrificantes não são utilizados, uma vez que seriam rapidamente degradados sob as altas temperaturas. Além disso, a tensão de escoamento fica muito mais baixa, tornando o pó mais fácil de compactar.

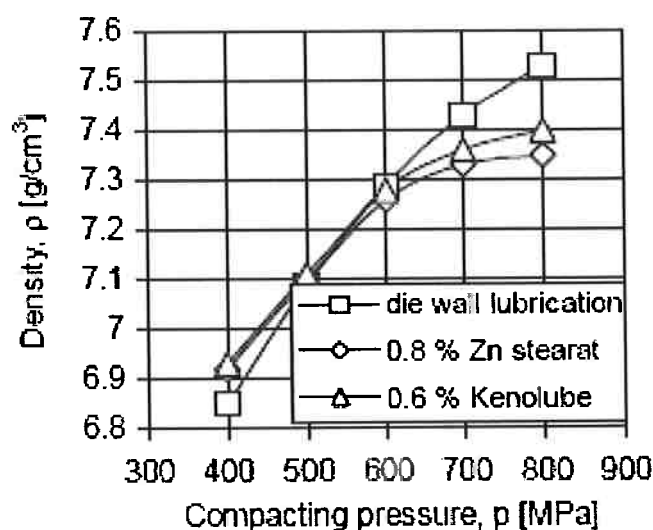
A compactação a frio, por sua vez, requer a utilização de lubrificantes sólidos visando a redução de atrito entre as partículas e a parede do molde. Ao fazer isso, concentram-se as forças aplicadas na deformação do pó metálico ao invés de perder energia sob a forma de calor gerado pelo contato melhorando a uniformidade da densificação da peça.

Outra vantagem da utilização de lubrificantes é a uma redução da força necessária para extrair a peça da matriz usada para compactação, fato que por si só já aumenta a vida útil da ferramenta e melhora o acabamento superficial dos produtos, reduzindo ou eliminando a necessidade de retífica em alguns casos.

Uma característica de alguns lubrificantes é o fato de se concentrarem nas paredes durante a compactação, diminuindo a quantidade que fica entre as partículas, potencializando as vantagens citadas acima.

No entanto, para realizar a compactação a frio os lubrificantes tradicionalmente utilizados à base de ceras sintéticas ou estereatos metálicos apresentam sérios problemas durante o processo.

Em primeiro lugar, os lubrificantes à base de cera não suportam aquecimento, degradando-se e perdendo sua função. Outro problema é que a adição em excesso de lubrificantes pode comprometer a densidade e a resistência a verde das peças. Isso ocorre porque ao se ultrapassar sua quantidade ideal na mistura, esta quantidade a mais vai começar a se acumular em algum ponto entre as partículas metálicas reduzindo a interação entre estas. Assim sendo, o atrito metal-metal que não era desejado durante a compactação passa a ser importante no período pós-compactação e esse lubrificante em adicional reduz esse coeficiente. Além disso, as temperaturas envolvidas na sinterização da peça irão degradar todo o material não metálico e no seu lugar restará apenas um vazio, o qual contribuirá para aumentar a porosidade e reduzir a densidade total, como pode ser observado no gráfico abaixo.



**Gráfico 12 – Comparação da densidade em função da quantidade de lubrificante adicionado à mistura de pós.**

Assim sendo, a compactação a morno só passou a ser possível com o desenvolvimento de novos lubrificantes, poliméricos e resistente às temperaturas empregadas no processo. Estes, por sua vez, apresentam ainda uma característica extra que beneficia a compactação ainda mais, que é o fato de, ao contrario dos lubrificantes tradicionais, não se espalhar por toda a superfície dos pós metálicos, permanecendo sob a forma de partículas, além de apresentar baixa deformabilidade. Ou seja, com base neste ultimo fator conclui-se que esse tipo de lubrificante não absorve, ou absorve pouco, a força aplicada pela prensa, concentrando-a na deformação das partículas e ainda facilita a movimentação destas.

Para que o processo ocorra corretamente o lubrificante precisa ser capaz de suportar as temperaturas envolvidas na compactação, que para a técnica de compactação a morno estão tipicamente situadas entre 90°C e 150°C.

Outro aspecto muito interessante do ponto de vista da compactação utilizando-se lubrificantes poliméricos é o fato de que por possuírem cadeias moleculares grandes que se repetem, pode ocorrer de essas se alinharem e deslizarem umas sobre as outras quando submetidas a tensões de cisalhamento, reduzindo ainda mais o atrito entre as partículas metálicas.

Partindo do fato de que o lubrificante é necessário para a metalurgia do pó quando trabalha-se com as temperaturas envolvidas neste estudo, este é fornecido às indústria que o processam já misturado com o metal. Todavia, um aumento na

quantidade de lubrificante reduz a compressibilidade do pó. O gráfico abaixo ilustra este fato, onde a maior densidade foi atingida com lubrificação apenas da parede do molde e o pó com maior porcentagem de lubrificante registrou considerável diminuição da densidade para um mesmo pó metálico.

#### *2.4. Compressibilidade*

A densidade a verde que pode ser atingida utilizando-se uma matriz fechada é função de diversos fatores, podendo estes estarem relacionados ao processo ou às características de cada parte dele, como as condições de compactação e do material, tamanho e complexidade da peça. Todavia, o fator principal é a compressibilidade do pó de ferro.

A compressibilidade define a capacidade do pó de ser densificado, ou seja, representa a relação entre a densidade a verde e a pressão aplicada durante a compactação. Pode-se também caracterizá-la como a medida do decréscimo de volume que se obtém na operação de compactação.

Usualmente a compressibilidade de um material é expressada como a pressão necessária para atingir uma determinada densidade a verde.

#### *2.5. Pore Free Density*

Em uma tradução livre, Pore Free Density ou PFD seria a densidade sem poros, ou seja, é o valor de densidade conseguido caso toda a porosidade da mistura utilizada na confecção da peça seja removida. Basicamente este valor é calculado com base na densidade de cada material que faz parte da mistura e as respectivas porcentagens. Assim, ao adicionar-se outros elementos com maior

massa específica como Níquel, Cobre ou Molibdênio a um pó que tem ferro como base ( $7,68\text{g/cm}^3$ ), a PFD aumenta proporcionalmente às porcentagens adicionadas. O mesmo ocorre para a adição de elementos menos densos, como carbono ou a maioria dos lubrificantes.

Este fato ajuda a reforçar o fato de que o excesso de lubrificantes em uma mistura a ser trabalhada diminui a densidade final da peça.

Na prática é impossível atingir a PFD durante a fase de compactação da mistura. Trabalhando na temperatura ambiente e utilizando métodos tradicionais de compactação a densidade é limitada naturalmente pela compressibilidade do material e, mesmo utilizando a compactação a morno, a densidade limita-se a, no máximo, cerca de 98,5% da PFD.

### **3. Objetivos, Materiais e Procedimento experimental**

#### *3.1. Objetivos*

Sabendo que a densidade a verde de peças compactadas é um parâmetro crítico para a produção de peças utilizando a metalurgia do pó, este trabalho visa verificar a influência que a pressão de compactação e a temperatura utilizadas para aquecer tanto o pó quanto a matriz, tem sob a densidade a verde de peças confeccionadas com pós com base de ferro.

Foram utilizados para este estudo dois tipos de pó, o FC-0208, e o FLC-4608, sendo que o primeiro é uma mistura elementar com Cobre e Carbono misturados ao pó de ferro enquanto o segundo consiste de um pó pré-ligado, onde os elementos envolvidos são fundidos juntos para formar a liga que será atomizada posteriormente formando o pó contendo Níquel, Cobre, Molibdênio e Carbono.

Assim sendo vamos analisar como a densidade a verde é alterada pela variação dos parâmetros mencionados acima.

### 3.2. Materiais

Os pós utilizados nesse estudo são de dois tipos, o FC-0208 que é um pó elementar enquanto o outro, FLC-4608, é um pó pré-ligado.

Os pós elementares são aqueles cujos elementos químicos que o compõe são misturados já no estado sólido, de modo que não há ligação química destes enquanto o pó não é utilizado. Os pós são atomizados individualmente e misturados posteriormente.

Já nos pós pré-ligados, os elementos constituintes deste são todos fundidos juntos e, depois de formada a liga metálica, atomizados. Ou seja, cada partícula desse pó ao ser analisada deveria apresentar as mesmas composições químicas.

Seguindo as normas da MPIF (Metal Powder Industries Federation) as composições químicas dos pós envolvidos neste estudo são as seguintes:

	Fe (%)	Cu (%)	C (%)	
FC-0208	restante	1,50	0,60	mínimo
	restante	3,90	0,90	máximo

**Tabela 3 – Composição química do pó FC-0208**

	Fe (%)	C (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)	Mn (%)	
FLC-4608	restante	0,60	1,60	0,43	1,00	0,05	mínimo
	restante	0,90	2,00	0,60	3,00	0,30	máximo

**Tabela 4 – Composição química do pó FLC-4608**

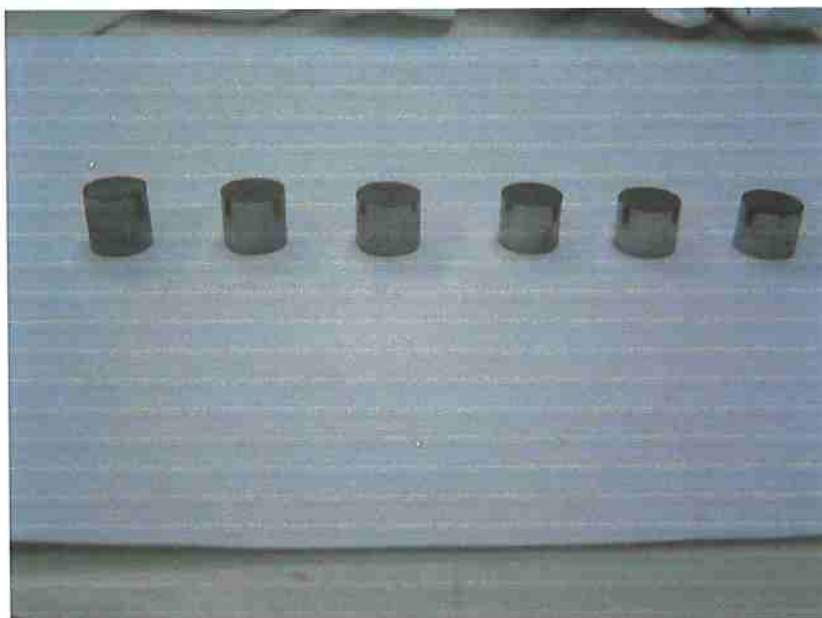
### 3.3. Curvas de Compressibilidade

Uma vez que o objetivo desse estudo é comparar as densidades obtidas com aquecimento do pó e da matriz a diferentes temperaturas e pressões com a densidade do mesmo pó compactado à temperatura ambiente (comum em ambiente de produção), o primeiro passo foi levantar curvas de compressibilidade para ambos os materiais envolvidos, FC-0208 e FC-4608.

Para tal foi necessário realizar a compactação dos pós utilizando uma matriz de área conhecida e criar corpos de prova compactando os pós com pressões variando crescentemente. Assim sendo utilizou-se uma matriz de área igual a  $1 \text{ cm}^2$  e, através de uma prensa com indicador de pressão, variou-se a pressão aplicada iniciando-se com 200 MPa e repetindo o procedimento até chegar a 700 MPa.

Originalmente desejava-se chegar à 800 MPa, no entanto a matriz disponível estaria trabalhando muito próxima do seu limite de modo que, por motivos de segurança, foi decidido utilizar no máximo 700 MPa.

Após essa etapa havia 6 corpos de prova para cada pó, cada um compactado a uma pressão diferente. Deste modo bastava pesar e medir a altura de cada um deles, já que a área é conhecida ( $1 \text{ cm}^2$ ).

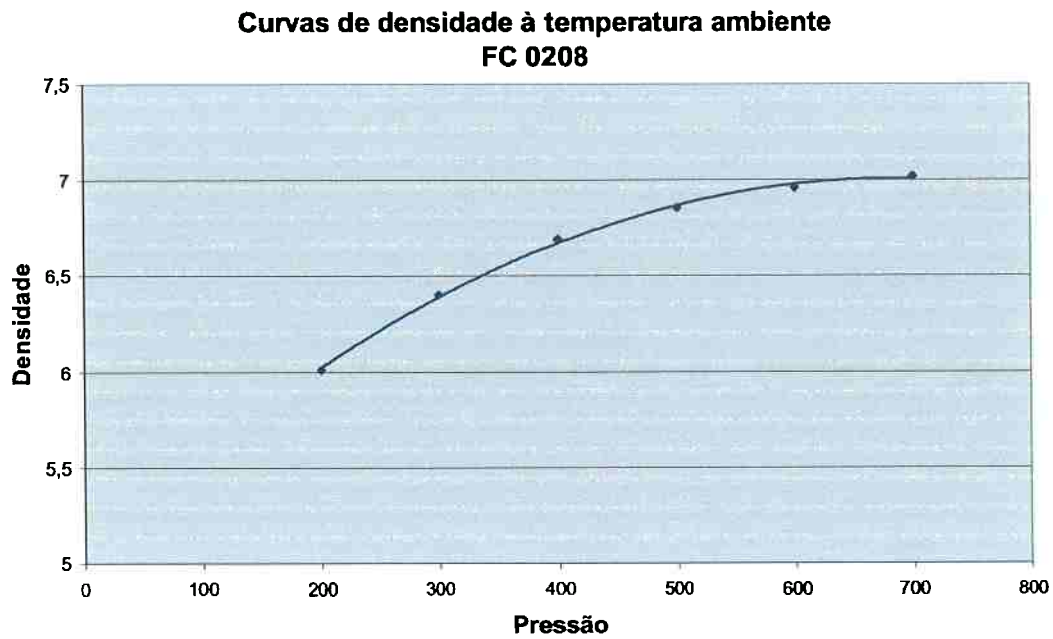


**Figura 19 – Corpos de prova utilizados para determinar a curva de compressibilidade**

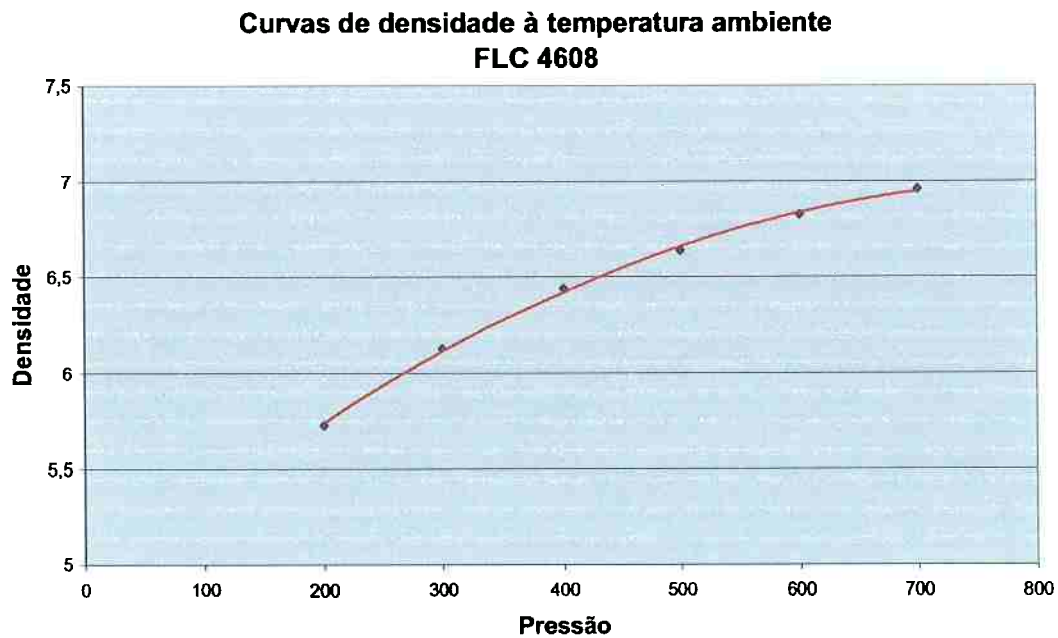
Então, utilizando um paquímetro as alturas foram obtidas e sabendo que o volume é igual a área da base multiplicado pela altura, pudemos calcular a densidade dividindo a massa por esse valor obtido.

Como foram utilizadas massas constantes para levantar a curva de compressibilidade, a altura das peças era inversamente proporcional às densidades, com a peça maior tendo a menor densidade. Ou seja, quanto menor a pressão aplicada, menos compactado o pó ficava e maior a altura do corpo de prova.

Finalmente bastava posicionar esses dados em um gráfico de densidade por pressão como o seguinte:



**Gráfico 13 – Curvas de Compressibilidade do pó metálico FC-0208**



**Gráfico 14 – Curvas de Compressibilidade do pó metálico FLC-4608**

### 3.4. Determinação das densidades a verde.

Para a realização da compactação a morno é necessário, conforme o próprio nome já diz, aquecer o material envolvido no processo. Todavia as temperaturas a serem utilizadas não são elevadas se levarmos em conta os processos metalúrgicos em geral.

Para o estudo descrito por este trabalho foi utilizada uma matriz com 25 mm de diâmetro para confecção do corpo de prova, constituída por uma base, um pistão e o corpo externo conforme figura abaixo.



**Figura 20 - Matriz**

A matriz em questão foi aquecida juntamente com o pó a ser compactado a fim de atingirem a mesma temperatura. Para esta etapa dois procedimentos tiveram de ser adotados em função das disponibilidades dos laboratórios utilizados, uma vez que a prensa onde os estudos começaram a ser realizados não era capaz de aplicar as pressões desejadas.

No primeiro caso o forno tinha dimensões grandes o suficiente para poder acomodar as amostras já pesadas de pós em pequenos recipientes cerâmicos juntamente com a matriz.



**Figura 21 – Forno utilizado para aquecer as amostras de pó e a matriz**

Deste modo colocou-se as amostras de pó já na quantidade desejada dentro do forno juntamente com a matriz e nesta e inseriu-se um termopar para controlar a temperatura do sistema. Após a temperatura atingir o valor desejado ainda aguardou-se cerca de uma hora para que houvesse a devida homogeneização nas peças e nos pós.

Após esta etapa, a matriz era retirada do forno e montada colocando-se o pó no seu interior e colocada na prensa.



**Figura 22 – Prensa utilizada durante os ensaios**

A prensa ilustrada pela figura acima tem um limite de 30 toneladas de força a ser aplicada, de modo que com a área da matriz de aproximadamente  $4,9 \text{ cm}^2$  a pressão máxima que poderia ser obtida era de 600 MPa.

Para a prensa em questão foram obtidos os corpos de prova para as pressões de 500 MPa e 600 MPa em todas as temperaturas desejadas, 75°C, 100 °C e 125 °C.

Após concluída esta etapa restava ainda produzir os corpos de prova com a pressão de 700 MPa. Assim sendo foi necessário utilizar uma prensa com maior potencia em outro laboratório, fato que obrigou a uma pequena mudança nos procedimentos.

Em função da capacidade do forno ser inferior ao primeiro e, além disso, as dimensões toleradas pelo mesmo também serem menores, mais especificamente do tamanho quase exato da matriz, passou-se a ser necessário aquecê-la já com o pé no seu interior. Assim sendo o pó era pesado e colocado dentro da matriz. O conjunto por sua vez era pré-compactado com 100 MPa de modo a obter apenas uma estrutura firme o suficiente para ser transportada e não derramar o pó no forno.

Para realizar esta pré-compactação utilizou-se uma prensa similar a primeira porém com menor potência.



**Figura 23 – Prensa utilizada para pré-compactação**



**Figura 24 – Forno utilizado para aquecer o pó e a matriz**

O forno ilustrado acima foi pré ajustado para a temperatura desejada e tinha também indicava a temperatura real. Deste modo foi necessário esperar pela

estabilização e aguardar cerca de 30 minutos para a homogeneização da matriz e do pó.

Em seguida levou-se a matriz para a prensa e compactou-se o pó com 700 MPa (35 toneladas de força) para as 3 temperaturas envolvidas neste estudo.

A prensa em questão possui uma capacidade de aplicar até 400 toneladas de força, sendo mais que suficiente para este estudo.



**Figura 25 – Prensa utilizada para compactar as amostras com 700 MPa**

Produziu-se assim 3 peças para cada valor de pressão e temperatura para cada pó, chegando-se ao total de 54 corpos de prova.



**Figura 26 – Ilustração dos corpos de prova produzidos**

Com o auxílio de um paquímetro estas peças foram medidas quanto altura e diâmetro para que seu volume pudesse ser calculado. Também foram pesadas com ajuda de uma balança de precisão.

Com esses dados em mão bastava calcular a densidade das peças.

$$\begin{array}{ll} V = A \times h & \text{Onde:} \\ A = \frac{D^2 \times \pi}{4} & V = \text{Volume} \\ & A = \text{Área} \\ & h = \text{altura} \\ & D = \text{diâmetro} \\ & d = \text{densidade} \\ d = \frac{M}{V} & M = \text{Massa} \end{array}$$

**Figura 27 – Cálculo da densidade**

#### 4. Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos após toda a parte experimental ter sido concluída. Apesar de os corpos de prova terem sido pesados antes da compactação o procedimento foi necessário novamente para evitar que eventuais perdas de material influenciassem no resultado final.



Figura 28 – Ilustração de pesagem dos corpos de prova

Cada peça após ter sua massa estabelecida passou a ser medida com o auxílio de um paquímetro, de modo a obter os diâmetros e a alturas das peças.

Utilizando novamente as equações da figura 13 as densidade foram calculadas, para cada material, e comparadas com os valores obtidos na curva de compressibilidade.

Com o aumento da temperatura esperava-se um aumento na densidade a verde para todas as condições de pressão em relação à densidade obtida à temperatura ambiente para a curva de compressibilidade. Isto se da pelo fato de que pequenas variações no aquecimento do pó contribuem para diminuir significativamente a tensão de escoamento do metal, de modo que a mesma força que fora aplicada às partículas com o pó frio passa a ter mais capacidade de deformação elástica.

Para realizar esta comparação as seguintes densidades foram calculadas e apresentadas nas tabelas seguintes.

Densidade obtidas para o pó FC-0208		Pressão (MPa)		
		500	600	700
Temperatura	ambiente	6,86	6,96	7,02
	75°C	7,00	7,11	7,20
	100°C	7,03	7,12	7,23
	125°C	7,07	7,22	7,28

**Tabela 5 – Densidades para obtidas para o material FC-0208**

Densidade obtidas para o pó FLC-4608		Pressão (MPa)		
		500	600	700
Temperatura	ambiente	6,64	6,83	6,96
	75°C	6,84	6,94	7,08
	100°C	6,87	7,02	7,12
	125°C	6,88	7,12	7,15

**Tabela 6 - Densidades para obtidas para o material FLC-4608**

Podemos observar nas tabelas acima que houve um significativo aumento da densidade a verde tanto para o material FC-0208, que é um pó elementar, quanto para o FLC-4608, pré-ligado.

Para efeito comparativo também os gráficos 7 e 8 mostram a curva de compressibilidade juntamente com os valores de densidade obtidos para cada pressão de compactação utilizada, onde pode-se notar claramente o aumento de densidade para o caso de variar-se apenas um dos parâmetros. Aumentando a pressão aplicada e mantendo a temperatura constante podemos notar claramente o aumento da densidade. No entanto, mais importante ainda é registrar essa variação também no caso de elevar a temperatura quando uma mesma pressão é aplicada.

É este o resultado que o estudo em questão visava desde seu início, uma vez que ao variar-se apenas a temperatura de compactação conseguem-se valores significativamente maiores de densidade a verde, o qual que está intimamente ligado às propriedades mecânicas da peça após a sinterização.

Ou seja, com um aumento da relação massa por volume na fase em que a peça foi apenas compactada, pode-se relacionar este valor com o seu aumento para a peça após ser sinterizada e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas finais.

Os resultados desse estudo mostram o que diversas indústrias já notaram, que para a obtenção de peças de alta densidade a utilização do processo de compactação a morno pode representar uma economia significativa em relação aos tradicionais processos que utilizam temperatura ambiente. Não somente o custo é reduzido com o operacional é reduzido como também a velocidade de produção por peça influencia positivamente no custo final, uma vez que para um mesmo intervalo de tempo mais peças podem ser produzidas.

## Comparação de Resultados FC - 208

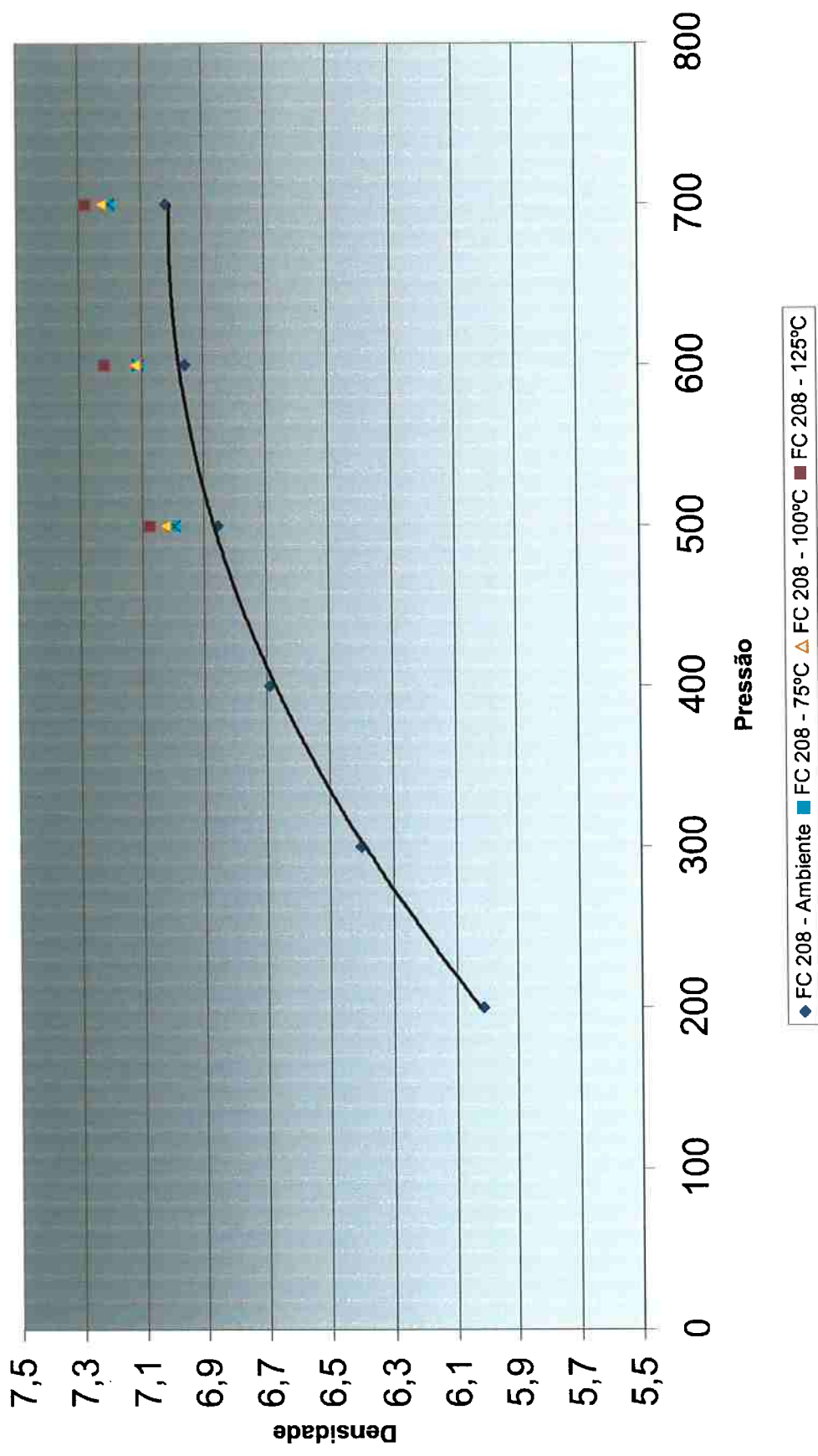


Gráfico 15 – Gráfico de comparação entre a curva de compressibilidade do pó FC 0208 e as densidades obtidas experimentalmente

## Gráfico de Comparação - FLC 4608

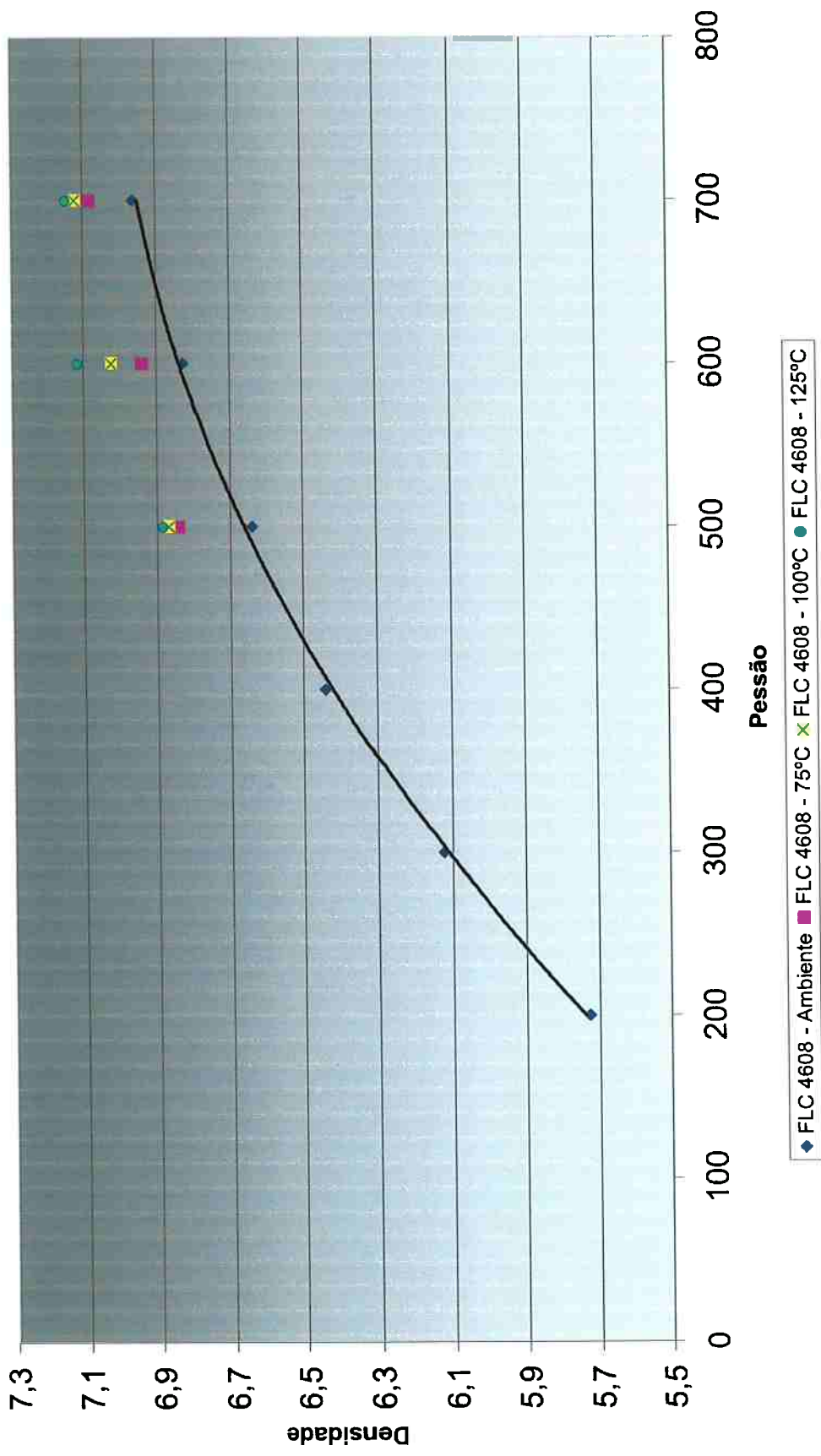


Gráfico 16 - Gráfico de comparação entre a curva de compressibilidade do pó FLC 4608 e as densidade obtidas experimentalmente

## 5. Conclusões

Este estudo atingiu seu objetivo de mostrar que a utilização de compactação a morno (warm compaction) consegue atingir densidade a verde consideravelmente superiores que quando utilizada a temperatura ambiente.

Não só isso, como as densidades obtidas são compatíveis com os valores obtidos por métodos mais complexos e, conseqüentemente, que geram maiores gastos para a indústria. Assim sendo, o processo mostra-se uma ótima alternativa para a confecção de peças de altas propriedades mecânicas, que requerem altas densidades.

Os resultados experimentais obtidos mostram com clareza que para uma mesma pressão mas com o aumento da temperatura a densidade a verde aumenta, fato que acarretara em uma maior densidade após sinterizado também.

## 6. Referencias

- [1]. Höganäs AB: “Höganäs handbook for sintered components”
- [2]. ASM International: “Powder Metal Technologies and Applications”, Handbook vol.7, The Material Information Society (1998)
- [3]. Pallini, M.A.T. ; Carvalho, M.A.T. : “A Redução de Custo na Indústria Automotiva através do Sinterizado”
- [4]. St-Laurent, S. and Chagnon, F. : “Influence of Powder Mix Formulation on Green and Sintered Properties of Warm Pressed Specimens”
- [5]. St-Laurent, S. and Chagnon, F. : “ Behaviour of Steel Powder Mixes Processed by Warm Compaction”
- [6]. Cimino, T. M. ; Rawlings, A. J. and Rutz, H. G.: “Properties of Several Arcodense Processed High Performance Material”
- [7]. Vidarsson, H.; Johansson, B. and Knutsson, P.:” Performance and Capabilities of Powder Mixes during Warm Compaction”
- [8]. Rutz, H.; Hanejko, F. and Miller, T.: The Application of Warm Compaction to High Density Powder Metallurgy Parts”
- [9]. Orban, R.L.: “New Research Directions in Powder Metallurgy”
- [10]. St-Laurent, S. and Chagnon, F. : “Key Parameters for Warm Compaction of High Density Materials”
- [11]. Tremblay, L.; Chagnon, F. and Thomas, Y.: “Enhancing Green Strength on P/M Materials”
- [12]. <http://www.pickpm.com/> “A Powder Metallurgy Information Source” – Diversos textos no site