

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Cavaco de um Aço Inoxidável Austenítico
Reciclado por Metalurgia do Pó: Uma Rota
Alternativa para o Reaproveitamento de
Materiais Metálicos**

Autor: Daniel Yvan Martin Delforge
Orientador: Itamar Ferreira

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Cavaco de um Aço Inoxidável Austenítico Reciclado por Metalurgia do Pó: Uma Rota Alternativa para o Reaproveitamento de Materiais Metálicos

Autor: Daniel Yvan Martin Delforge
Orientador: Itamar Ferreira

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007-08-29
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

D378c Delforge, Daniel Yvan Martin
Cavaco de um aço inoxidável austenítico reciclado por metalurgia do pó: uma rota alternativa para o reaproveitamento de materiais metálicos / Daniel Yvan Martin Delforge.-- Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Itamar Ferreira
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. aço inoxidável austenítico. 2. Sinterização. 3. Metalurgia do pó. 4. Metais – Reaproveitamento. I. Ferreira, Itamar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Austenitic stainless steel chip recycling by powder metallurgy an alternative rote for metallic recycling.

Palavras-chave em Inglês: Powder metallurgy, Sintering, Stainless steel chip, recycling

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Maria Clara Fillippini Ierardi, Juno Gallego, Carlos Alberto Picon, César Augusto Duarte Rodriguez

Data da defesa: 25/07/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

**Cavaco de um aço inoxidável austenítico reciclado
por metalurgia do pó: uma rota alternativa para o
reaproveitamento de materiais metálicos.**

Autor : **Daniel Yvan Martin Delforge**

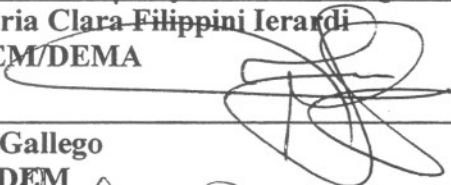
Orientador: **Itamar Ferreira**



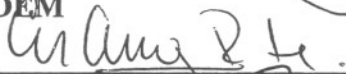
Prof. Dr. Itamar Ferreira, Presidente
UNICAMP/FEM/DEMA



Prof.^a. Dr.^a. Maria Clara Filippini Ierardi
UNICAMP/FEM/DEMA



Prof. Dr. Juno Gallego
UNESP/FEIS/DEM



Prof. Dr. César Augusto Duarte Rodriguez
USP/EESC/DEMAA



Prof. Dr. Carlos Alberto Picon
UNESP/FEIS/DFQ

Campinas, 25 de julho de 2007

*“Quando nada parece ajudar, eu vou e olho o cortador de pedras martelando sua rocha talvez cem vezes, sem que nenhuma só trinca apareça. No entanto, na centésima primeira martelada, a pedra se abre em duas, e eu sei que não foi aquela a que conseguiu, mas todas as que vieram antes”.
(Jacob Riis)*

Dedico esse trabalho à minha esposa Sirlene, à minha filha Ericka, à minha irmã Mariane e aos meus pais Gisele e Willy.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Itamar Ferreira pela orientação, amizade e constante estímulo;

À Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, em especial à Faculdade de Engenharia Química, pelo trabalho de microscopia eletrônica de varredura;

À FUNDUNESP, pelo auxílio financeiro;

À METALPÓ Ind. e com. Ltda., pelo fornecimento dos materiais e insumos e pela sinterização dos corpos-de-prova em ambiente industrial. Em especial ao Sr. Marcelo Peçanha, gerente industrial de produção de pós da METALPÓ;

Aos colegas e técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, DEM/FEIS/UNESP, que, de alguma maneira contribuíram, na realização deste trabalho, em especial aos amigos Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu; Prof. Dr. Cássio Roberto Macedo Maia; Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini, pelo incentivo, e, também, em especial, aos técnicos Marino Teixeira Marinho, Reginaldo Cordeiro e Darcy Alves Ribeiro, pelo inestimável apoio técnico de que precisei;

Aos meus orientados ex-alunos: César Garcia Rocha da Silva, André Luis Marcelo, Rafael Henrique Novaes, Eduardo Antônio Gaeti Paris e Renato César Ribas Peres, pela colaboração na confecção dos corpos-de-prova e na preparação das amostras metalográficas.

Publicações

O presente trabalho resultou nas seguintes publicações:

- Delforge, D.Y.M.; Ferreira, I.; Silva, C. G. R.; Paris, E. A. G.; Novaes, R.H., "***Sintering by Means of Powder Metallurgy of the Scrap and Powder 316L Stainless Steel Mixture***", XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT - Foz do Iguaçu, 2006.
- Delforge, D. Y. M.; Ferreira, I.; Silva, C. G. R.; Paris, E. A. G.; Marcelo, A. L., "***The Influence of Scrap Percentage in the Mechanical Behavior of a Mixture of 316L Stainless Steel Scrap and the Sinterized Powder of the Same Material***", XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT - Foz do Iguaçu, 2006.
- Delforge, D.Y.M.; Ferreira, I.; Souza, D.L., "***Reciclagem de cavaco de ligas de cobre via metalurgia do pó***" - Revista Máquinas e Metais, v. 40, n. 465, p. 182-189, 10/2004 – tiragem: 15.000 Exemplares.
- Delforge, D.Y.M.; Ferreira,I.; Silva C.G.R.; Paris, E.A.G.; Marcelo, A.L.; Novaes, L.R.H., "***Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?***", REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(4), out. dez.2006.

Resumo

DELFORGE, Daniel Yvan Martin. Cavaco de um aço inoxidável austenítico reciclado por metalurgia do pó: uma rota alternativa para o reaproveitamento de materiais metálicos. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 94 p. Tese (Doutorado).

A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos, minimizar os impactos ambientais e racionalizar a utilização das cadeias energéticas. No presente trabalho foram compactadas e sinterizadas amostras de mistura de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L, com pó do mesmo material. A porcentagem de cavaco variou de zero a 25% em peso, de 5 em 5%. Após a compactação, na pressão de 600MPa, as amostras foram sinterizadas, simultaneamente, na temperatura de 1473K. O comportamento mecânico do produto final foi avaliado através de Ensaios de Ruptura Transversal, recomendados e normalizados pela MPIF - Metal Powder Industries Federation e pela ASTM - American Society for Testing and Materials. As análises foram realizadas por Metalografia Convencional, associada à microscopia eletrônica de varredura nas amostras sinterizadas, resultaram em regiões de intensa difusão, portanto, regiões de sinterização de longo alcance. A resistência mecânica dos corpos-de-prova foi comparada com a resistência mecânica do aço inoxidável sinterizado, sem cavaco, determinado através do Módulo de Ruptura (MOR). A média máxima do MOR das amostras sem cavaco, foi de 457 MPa; com 5% de cavaco, de 358 MPa e com 25% de cavaco, 174MPa. Os resultados alcançados mostraram significativos valores, demonstrando ser esta uma rota alternativa para a reciclagem de cavaco de materiais metálicos, aliado à racionalização da utilização de energia e benefícios para o meio ambiente.

Palavras-chave: metalurgia do pó, sinterização, cavaco de aço inoxidável.

Abstract

DELFORGE, Daniel Yvan Martin. Austenitic stainless steel chip recycling by powder metallurgy: an alternative route for metallic recycling. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 94 p. Tese (Doutorado).

In the present work, samples of the mixture of 316-stainless steel chip and its powder have been sinterized. The chip weight percentage, in this particular case, has varied from zero to 25%, in increments of 5. After having been compacted under a pressure of 600MPa, all the samples were simultaneously sinterized in just one furnace batch under a temperature of 1473K. The mechanical behavior of the final product was assessed through the assays of transversal rupture test as recommended and regulated by Metal Powder Industries Federation - MPIF and by American Society for Testing and Materials – ASTM. Analyses of these sinterized samples carried out by conventional quantitative metallography show areas of intense diffusion, therefore, areas of long sintered range. The mechanical strength of the assayed samples was compared to those made of sintered stainless steel, without chip. The Modulus of Rupture (MOR) achieved for samples which contain 5%, 25% of chip and without chip were respectively 358MPa, 174MPa and 457MPa. The results achieved have overcome the expectations and there are strong evidences of the feasibility of this procedure.

Key words: powder metallurgy, sintering, stainless steel chip, recycling.

SUMÁRIO

Listagem das figuras.....	x
Listagem das tabelas.....	xix
Simbologia.....	xx

CAPÍTULO 1

Introdução.....	01
1.1. Considerações iniciais.....	01
1.2. Objetivos.....	05
1.3. Justificativa.....	06

CAPÍTULO 2

2.1. Evolução histórica da metalurgia do pó.....	10
2.2. Operações básicas na fabricação de peças sinterizadas.....	12
2.3. Produção dos pós.....	13
2.4. Fornos de sinterização.....	14
2.4.1. Sinterização por fornada.....	15
2.4.2. Sinterização em fornos contínuos.....	16
2.5 Atmosfera protetora para a sinterização.....	17
2.5.1. Seleção da atmosfera protetora.....	19
2.6. Obtenção de atmosfera protetora	21
2.6.1. Atmosferas geradas <i>in loco</i>	22
2.6.1.1. Amônia dissociada (DA).....	22
2.6.1.2 Atmosfera endotérmica.....	23
2.6.1.3 Atmosfera exotérmica.....	24
2.6.1.4 Atmosfera sintética.....	24

CAPÍTULO 3

3.1. Materiais e métodos.....	27
3.1.1. Procedimento para geração dos cavacos.....	27
3.2. Mistura dos pós com cavacos, compactação, sinterização e ensaios dos corpos-de-prova	31
3.2.1. Mistura dos pós com cavacos.....	31
3.2.2. Compactação dos corpos-de-prova.....	34
3.2.3. Sinterização dos corpos-de-prova.	34
3.2.4. Ensaios de flexão apoiado em três pontos.....	36
CAPÍTULO 4	
4.1. Resultados e discussão.....	37
4.1.1. Resultados dos ensaios flexão apoiado em três pontos.....	37
4.1.2. Discussão e conclusão dos ensaios preliminares.....	48
4.2. Resultados dos ensaios definitivos de ruptura transversal em três pontos.....	50
4.2.1. Curvas médias de cada condição de ensaio.....	66
4.2.2. Discussão das curvas médias de Cada Condição de Ensaio.....	72
4.2.3. Fotomicrografias – MO e MEV	75
4.2.4. Análise e discussão das fotomicrografias apresentadas	82
CAPÍTULO 5	
5.1. Conclusões.....	85
5.2. Sugestões de trabalhos futuros.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTAGEM DAS FIGURAS

FIGURA	LEGENDA	PÁGINA
CAPÍTULO 1		
1.1.	Peças típicas obtidas através da metalurgia do pó.....	05
1.2.	Esquema geral das etapas que devem ser cumpridas na reciclagem de cavacos de materiais metálicos.....	06
1.3.	Esquematização de uma metodologia eficiente e vantajosa que possibilita a reciclagem de cavacos de materiais metálicos, via Metalurgia do Pó.....	07
1.4.	Mistura de cavaco e pó de cobre e bronze, respectivamente. Observa-se, além de poros, que são inerentes aos materiais sinterizados, regiões de intensa interação metalúrgica. Algumas dessas regiões estão apontadas pelas setas.....	07
1.5.	Mistura de cavaco e pó de cobre. Observa-se, além de poros, que como foi visto, são inerentes aos materiais sinterizados, regiões de interação metalúrgica entre cavaco de cobre e pó de bronze e de ferro. Algumas dessas regiões estão apontadas pelas setas.....	08
CAPÍTULO 2		
2.1.	Principais operações na fabricação de peças metálicas sinterizadas.....	11
2.2.	a) pó de cobre. b) pó de estanho.....	12
CAPÍTULO 3		
3.1.	Diferentes formas que os cavacos assumem quando são gerados durante operações de torneamento.....	28
3.2.	(a) Dimensões e geometria do quebra-cavaco e (b) medidas principais da pastilha, sendo $iC=12$ mm, $r_{\epsilon}=0,8$ mm, $l=12$ mm e $s=4$ mm.....	29
3.3.	Suporte para o inserto quadrado especificado.....	30
3.4.	Geração do cavaco. A) Utilizando serra mecânica; B) Em torno mecânico.....	31
3.5.	Misturador Y instalado num torno convencional.....	33
3.6.	Representação esquemática da matriz flutuante utilizada na compactação dos corpos-de-prova.....	34

3.7. Esquematização do sistema utilizado para a sinterização dos corpos-de-prova de aço inoxidável austenítico 316L.....	35
3.8. Forno utilizado para a sinterização dos corpos-de-prova, na fase dos ensaios preliminares.....	35
3.9. (a) Dimensões dos corpos-de-prova; (b) desenho esquemático representando o suporte de corpos-de-prova, utilizado nos ensaios preliminares de ruptura transversal em três pontos. Distância entre os pontos de apoio: 25,4mm (1,0 polegada).....	36

CAPÍTULO 4

4.1. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2733N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.....	38
4.2. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2657N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.....	38
4.3. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2264N e a o deslocamento máximo foi de 0,49mm.....	39
4.4. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 2551N ($\sigma=251N$).....	39
4.5. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2876N e a o deslocamento máximo foi de 0,58mm.....	40
4.6. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3087N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.....	40
4.7. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2797N e o deslocamento máximo foi de 0,51mm.....	51

4.8. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 2920N ($\sigma=150N$).....	41
4.9. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3097N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.....	42
4.10. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3086N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.....	42
4.11. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3488N e a deformação máxima foi de 0,65mm.....	43
4.12. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3224N ($\sigma=228N$).....	43
4.13. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3511N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.....	44
4.14. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3095N e o deslocamento máximo foi de 0,55mm.....	44
4.15. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3307N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.....	45
4.16. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3304N ($\sigma=208N$).....	45
4.17. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da	

carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3378N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.....	46
4.18. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3576N e a deformação máxima foi de 0,58mm.....	46
4.19. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3343N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.....	47
4.20. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3432N ($\sigma=125N$).....	47
4.21. Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos, das várias condições de compactação.....	48
4.22. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7044N e o deslocamento máximo foi de 1,11mm.....	50
4.23. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 6786N e o deslocamento máximo foi de 0,96mm.....	51
4.24. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7247N e o deslocamento máximo foi de 1,09mm.....	51
4.25. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7035N e o deslocamento máximo foi de 1,07mm.....	52
4.26. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 6928N e a deformação máxima foi de	

1,07mm.....	52
4.27. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5480N e o deslocamento máximo foi de 0,63mm.....	53
4.28. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4804N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.....	53
4.29. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5982N e o deslocamento máximo foi de 0,75mm.....	54
4.30. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5356N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.....	54
4.31. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5876N e o deslocamento máximo foi de 0,70mm.....	55
4.32. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4452N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.....	56
4.33. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5019N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.....	56
4.34. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4822N e o deslocamento máximo foi de 0,65mm.....	57
4.35. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4587N e o deslocamento máximo foi de 0,76mm.....	57

4.36. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4280N e o deslocamento máximo foi de 0,57mm.....	58
4.37. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4157N e o deslocamento máximo foi de 0,65mm.....	58
4.38. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3156N e o deslocamento máximo foi de 0,54mm.....	59
4.39. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3988N e o deslocamento máximo foi de 0,57mm.....	59
4.40. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3437N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.....	60
4.41. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3789N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.....	60
4.42. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3393N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.....	61
4.43. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4122N e o deslocamento máximo foi de 0,68mm.....	61
4.44. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3839N e o deslocamento máximo foi de 0,70mm.....	62
4.45. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP4). Neste caso, o valor	

da carga máxima foi de 3428N e o deslocamento máximo foi de 0,62mm.....	62
4.46. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3428N e o deslocamento máximo foi de 0,58mm.....	63
4.47. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3412N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.....	63
4.48. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2400N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.....	64
4.49. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2656N e o deslocamento máximo foi de 0,52mm.....	64
4.50. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2782N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.....	65
4.51. Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 33412N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.....	65
4.52. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova que não continham cavaco (0% de cavaco). Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 7008N ($\sigma=169\text{N}$) e a dos deslocamentos foi de 1,06mm ($\sigma\varepsilon=5,8\times 10^{-2}\text{mm}$).....	66
4.53. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 5% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 5500N ($\sigma=468\text{N}$) e a dos deslocamentos foi de 0,64mm ($\sigma\varepsilon=5,6\times 10^{-2}\text{mm}$).....	67
4.54. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 10% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 4632N ($\sigma=293\text{N}$) e a dos deslocamentos foi de 0,63mm ($\sigma\varepsilon=7,6\times 10^{-2}\text{mm}$).....	68

4.55. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 15% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 3705N ($\sigma=407N$) e a dos deslocamentos foi de 0,56mm ($\sigma\epsilon=4,8 \times 10^2 mm$).....	69
4.56. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 20% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 3640N ($\sigma=328N$) e a dos deslocamentos foi de 0,64mm ($\sigma\epsilon=5,2 \times 10^2 mm$).....	70
4.57. Gráfico da média dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 25% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 2666N ($\sigma=190N$) e a média dos deslocamentos foi de 0,57mm ($\sigma\epsilon=5,5 \times 10^2 mm$).....	71
4.58. Curva comparativa da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos, entre todos os gráficos das médias dos ensaios realizados.....	72
4.59. Fotomicrografias óptica de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados. A1 e B1, sem ataque. A2 e B2, com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40% , água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	75
4.60. Fotomicrografias óptica de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados, todas com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40% , água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se nas regiões adjacentes aos cavacos (regiões mais claras), áreas com sinterização de longo alcance. 10% de cavaco.....	76
4.61. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance entre pó e cavaco. 20% de cavaco.....	77
4.62. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	77
4.63. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo	

material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	78
4.64. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	78
4.65. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	79
4.66. Fotomicrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura MEV, de amostras de cavaco de aço inoxidável 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance.....	79
4.67. Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance. 5% em peso de cavaco.....	80
4.68. Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance e áreas nas quais ocorreu a falta de sinterização. 25% em peso de cavaco.....	80
4.69. Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance e uma região com falta de sinterização. 20% em peso de cavaco.....	81
4.70. Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance. 20% em peso de cavaco.....	81

LISTAGEM DAS TABELAS

TABELA	LEGENDA	PÁGINA
CAPÍTULO 2		
2.1.	Evolução da Metalurgia do Pó através da História da Humanidade.....	10
2.2.	Volume percentual de água, presente em diversos pontos de orvalho.....	20
2.3.	Efeitos provocados pela amônia dissociada, em função da sua concentração no ambiente de trabalho.....	22
2.4.	Composição de atmosfera endotérmica, em diversas condições.....	25
CAPÍTULO 3		
3.1.	Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante e adotados.....	30
3.2.	Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316L – [Tanto o pó quanto o cavaco têm a mesma composição química].....	32
3.3.	Distribuição granulométrica do pó de aço inoxidável austenítico AISI 316L.....	32
CAPÍTULO 4		
4.1.	Valores das cargas médias de ruptura e de deslocamento máximo do ponto de aplicação da carga.....	73
4.2.	Valores das cargas médias que foram necessárias para se deformar os corpos-de-prova em 0,40; 0,50 e 0,60mm respectivamente.....	73
4.3.	Queda da carga necessária para provocar um deslocamento do ponto de aplicação da carga de 0,4; 0,5 e 0,5mm.....	74

SIMBOLOGIA

a_p	.....	Profundidade de usinagem
B	.....	Conjunto de parâmetros geométricos e do material
dx	.....	Distância infinitesimal
f	.....	Avanço da ferramenta
r_ϵ	.....	Raio de ponta
v_c	.....	Velocidade de corte
σ	.....	Desvio padrão
κ_r	.....	Ângulo de posição
γ	.....	Ângulo de saída
ϵ_f	.....	Deformação crítica
ϕ	.....	Ângulo de folga

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A Metalurgia do Pó, é um processo de manufatura de produtos metálicos ferrosos e não ferrosos e de materiais cerâmicos. Distingue-se dos processos convencionais pela ausência de fase líquida ou presença parcial de fase líquida durante o processamento. No caso dos materiais metálicos, essa técnica de fabricação se caracteriza pela possibilidade de interações metalúrgicas no estado sólido. Essa técnica de fabricação permite a produção, na maior parte das vezes, de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas dentro de tolerâncias bastante apertadas, produção de componentes com certas características estruturais e físicas impossíveis de serem obtidas através de qualquer outro processo metalúrgico [1].

Caracteriza-se também pela fabricação e obtenção de peças em grandes quantidades sendo este um processo fabril que vem se desenvolvendo através dos tempos e conquistando cada vez mais o mercado de fabricação de peças para setores da indústria tais como a automobilística, eletrodomésticos, ferramentaria e de metal duro, aeroespacial, e uma infinidade de outras aplicações.

A Metalurgia do Pó pode ser dividida em duas etapas fundamentais: moldagem ou compactação e aquecimento ou sinterização. A compactação se dá pela aplicação de pressão nos pós, por intermédio de punções, no interior de matrizes cujas cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais, que resultam nos denominados *compactados verdes*. Nesta etapa verificam-se pontos de microsoldagem que conferem ao *compactado verde* uma resistência suficiente para que haja o transporte e manuseio para a etapa seguinte que é a sinterização. Geralmente a sinterização é realizada em fornos especiais, em temperaturas

próximas de 70% da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições muito bem controladas de temperatura, tempo e ambiente. Sendo esta última etapa a que propicia a resistência mecânica e outras propriedades ao material compactado [2, 3].

O controle exato da composição química desejada do produto final, a redução ou eliminação das operações de usinagem, o bom acabamento superficial, a pureza dos produtos obtidos e a facilidade de automação do processo produtivo são alguns dos motivos que tornaram a metalurgia do pó uma fonte produtora de peças para praticamente todos os ramos da indústria como o automobilístico, da informática, aeroespacial, material eletroeletrônico, de equipamentos e implementos agrícolas, têxtil, biomédico, e uma infinidade de outros [4, 5].

Atualmente, segundo a Metal Powder Industries Federation – MPIF e a European Powder Metallurgy Association – EPMA, nos Estados Unidos, na Europa e no Japão, são produzidas anualmente mais de três milhões de toneladas de peças sinterizadas ou seja, um crescimento bastante acentuado, considerando-se que em meados da década de 80 até o final dessa mesma década a produção de peças sinterizadas beirava um total de um milhão de toneladas, e crescimento anual próximo de 10% [4, 6-8].

Decididamente, a Metalurgia do Pó é um processo de fabricação que leva a economia de matéria prima ao extremo. Enquanto alguns processos convencionais chegam a gerar até 50% de sobras na forma de cavacos, carepas, rebarbas e outros, uma peça sinterizada leva consigo mais de 99% da matéria prima utilizada originalmente. A sinterização é considerada um processo produtivo conservador de energia e de material e, por excelência, não poluente [9, 10].

No mundo moderno, as buchas e os mancais porosos auto-lubrificantes transformaram-se em elementos mecânicos imprescindíveis, uma vez que os poros que são inerentes a todas as peças sinterizadas e de utilização convencional, tornam-se vazios que podem ser preenchidos com óleo lubrificante levando ao seguinte mecanismo de lubrificação: quando o eixo começa a girar apoiado no mancal, ele provoca um leve aquecimento na superfície que aumenta o volume e a fluidez do óleo contido nos poros interconectados fazendo com que o mesmo seja expulso desses poros e seja arrastado por mecanismo hidrodinâmico, formando assim um filme de óleo

que passa a proteger o sistema eixo-mancal. Quando cessa o movimento, este óleo é recolhido nos poros por capilaridade [11].

Além de poderem ser impregnadas com óleo lubrificante, as peças sinterizadas podem também ter os seus poros selados com resinas, com ligas metálicas, o que lhes conferem um aumento da resistência mecânica, podendo ser tratadas termicamente, termoquimicamente, cromadas, ferroxidadas, niqueladas e outros [7, 12].

No campo da caracterização dos materiais, os pós são avaliados quanto à sua escoabilidade, densidade, a chamada *densidade batida*, granulometria, morfologia além de várias outras propriedades. A caracterização do comportamento mecânico de corpos-de-prova vai desde o *compactado verde*, até o material já sinterizado, através de ensaios de flexão apoiado em três pontos, ensaios de alongamento entre vários outros [5, 13, 14-17].

Normalmente, o peso de uma peça sinterizada pode variar de alguns gramas até alguns quilos. No entanto existem casos especiais tais como pás de turbinas, onde tais peças podem chegar a 20,0kg mediante um processo de compactação denominado *compactação isostática a quente*. Nesse caso, a pressão de compactação gira em média em torno de 100MPa [18, 19].

Na fabricação de algumas peças tais como eixos com excêntricos, pinhões em pontas de eixos e outros, é possível conseguir-se reduções bastante significativas de custo, agregando-se peças sinterizadas com peças produzidas por outros processos. Neste caso, o processo de fabricação utiliza-se dos métodos convencionais para a "peça básica" e da Metalurgia do Pó para a "parte complexa" possibilitando assim uma redução nos custos de fabricação. Ainda, em alguns casos, é possível obter-se peças compactadas separadamente e sinterizadas acopladas umas às outras, formando um conjunto composto de duas ou mais partes.

Finalmente, tem-se também, um processo de sinterização com fase líquida que é de grande utilidade em sistemas onde os coeficientes de difusão, no estado sólido, são muito baixos o que, às vezes implica em tempos e em temperaturas de sinterização muito elevados, podendo inviabilizar o processo [20]. Tal processo não será abordado neste trabalho.

Pode-se citar várias vantagens da Metalurgia do Pó em relação aos processos convencionais de fabricação entre elas [8, 10, 21-22]:

- Produção de peças com tolerâncias bastante apertadas;
- Produção de peças com características físicas e químicas não obtidas pelos processos convencionais;
- Redução ao mínimo perdas de matéria prima;
- Eliminação e redução de diversas operações de usinagem;
- Facilidade de automação do processo;
- Obtenção de peças com geometria complexa e em grande escala tornando-se assim, altamente competitivo;
- Possibilita excelente acabamento superficial;
- Permite a utilização de características de resistência exatamente como requeridas pelos projetos;
- Permite a obtenção de densidade e porosidade controladas;
- Peças com elevado grau de pureza;
- Possibilita um elevado índice de isotropia estrutural;
- A temperatura de sinterização é menor do que a de fusão dos materiais, o que constitui importante vantagem técnica: fornos de concepção mais simples e de menor reatividade;
- Possibilita a fabricação de peças complexas e de peças simples com o mesmo grau de dificuldade.

Se por um lado, tem-se vantagens, do outro tem-se desvantagens e limitações[8, 10, 21-22]:

- Necessidade de grande volume de produção, uma vez que o custo do ferramental, é bastante elevado;

- Limitação na geometria e dimensões das peças, uma vez que há a necessidade de extração dessas peças, de uma matriz que no caso de ângulos negativos, o que dificulta o processo podendo torná-lo inviável;
- Limitação no tamanho das peças pois, a potência requerida para a compactação é proporcional à área da secção transversal, podendo levar à necessidade de se utilizar máquinas de grande porte, o que muitas vezes também pode tornar o processo inviável.

A figura 1.1., ilustra peças típicas obtidas através da Metalurgia do Pó.



FIGURA 1.1- Conjunto de peças típicas obtidas através da metalurgia do pó. Trata-se de buchas, pinos, juntas metálicas, bielas de compressores e de motores a combustão interna e uma infinidade de outras, que exigem um determinado padrão de qualidade, e que em inúmeras vezes, poderiam ser fabricadas a partir da compactação e posterior sinterização de certas misturas de cavaco proveniente dos processos de usinagem com metais em pó [23].

1.2- OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer as melhores condições necessárias para a compactação e posterior sinterização de misturas de cavacos do aço inoxidável austenítico AISI 316L com pó do mesmo aço inoxidável possibilitando assim uma rota alternativa para a reciclagem deste tipo de material, via Metalurgia do Pó, o que seria um procedimento alternativo

na produção de um material composto. Os resultados serão fundamentados por ensaios mecânicos de flexão em três pontos e caracterizados por fotomicrografias obtidas em MO e em MEV.

1.3- JUSTIFICATIVA

Normalmente na reciclagem, sucatas tais como os cavacos de metais de utilização convencional resultantes das operações de usinagem são coletados, subsequentemente fundidos e transformados em lingotes com composição química muito bem redimensionada, para finalmente serem re-trabalhados e transformados em produtos acabados ou semi-acabados por conformação plástica, usinagem, fundição ou outros processos de fabricação, conforme esquematizado de maneira bastante simplificada na figura 1.2.

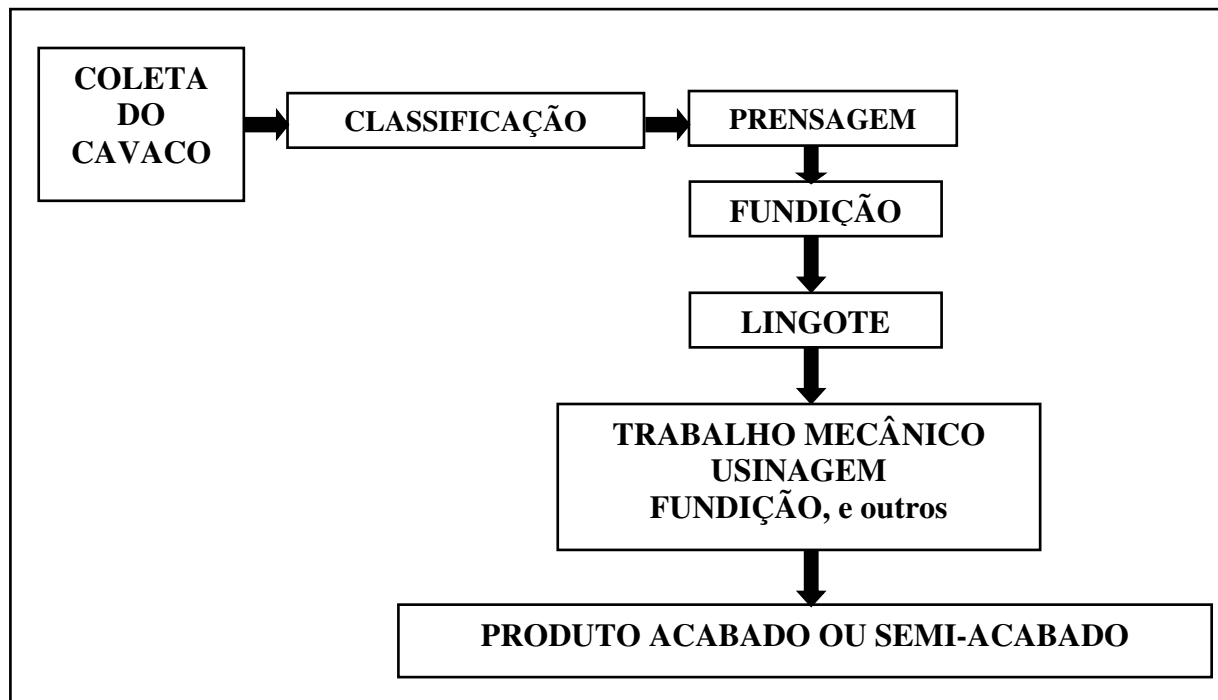


FIGURA 1.2- Esquema geral das etapas que devem ser cumpridas na reciclagem de cavacos de materiais metálicos.

Desse modo, há alguns anos, uma série de experimentos vêm sendo realizados no Laboratório de Metalurgia do Pó do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP, envolvendo a compactação e a sinterização de misturas de pó de bronze e pó de ferro, com cavacos de cobre.

Os resultados obtidos recentemente indicaram ser possível a confecção de corpos-de-prova e, conseqüentemente, a fabricação de produtos acabados ou semi-acabados, via Metalurgia do Pó. Eliminando-se assim várias etapas da reciclagem convencional destes metais pela compactação e posterior sinterização dessas misturas de cavaco e pó, conforme esquematizado na figura 1.3. Sendo assim, esse procedimento leva a uma conseqüente redução dos custos, e traz benefício ao meio ambiente e racionalização e diminuição do aporte energético na fabricação de inúmeros tipos de peças.

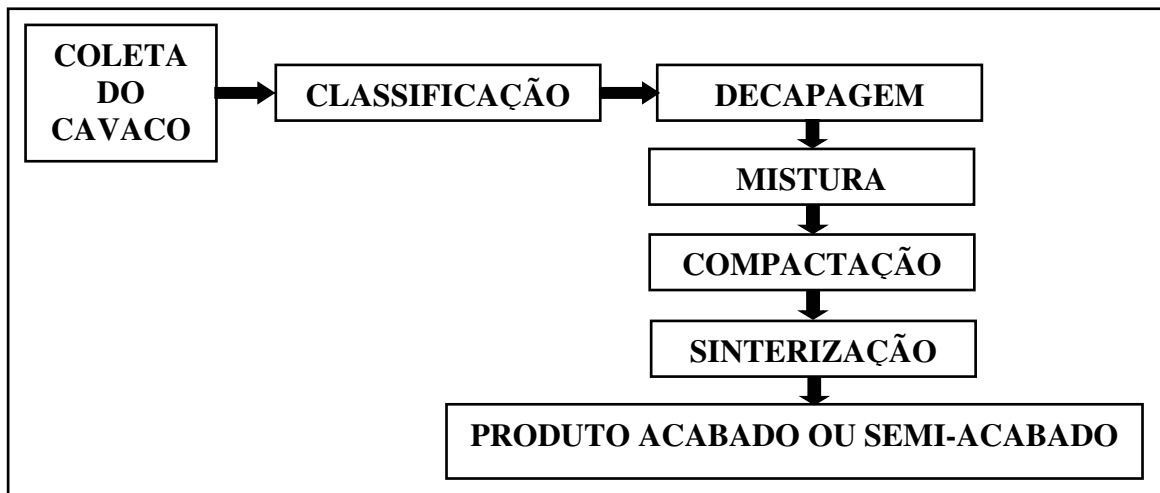


FIGURA 1.3- Esquematização de uma metodologia eficiente e vantajosa que possibilita a reciclagem de cavacos de materiais metálicos, via Metalurgia do Pó.

Com a nova metodologia, procurou-se, via Metalurgia do Pó, a reciclagem de cavaco de ligas de cobre, como citado anteriormente, provenientes de processos de usinagem convencional, tais como torneamento e corte por serra mecânica automática. Os resultados preliminares obtidos com sucesso, permitiram ressaltar algumas observações através da microscopia óptica, e, duas delas estão ilustradas nas figuras 1.4 e 1.5. Das quais pode-se verificar regiões de grande difusão atômica, portanto, regiões de sinterização bastante intensa entre cavacos e pós desses metais [24].

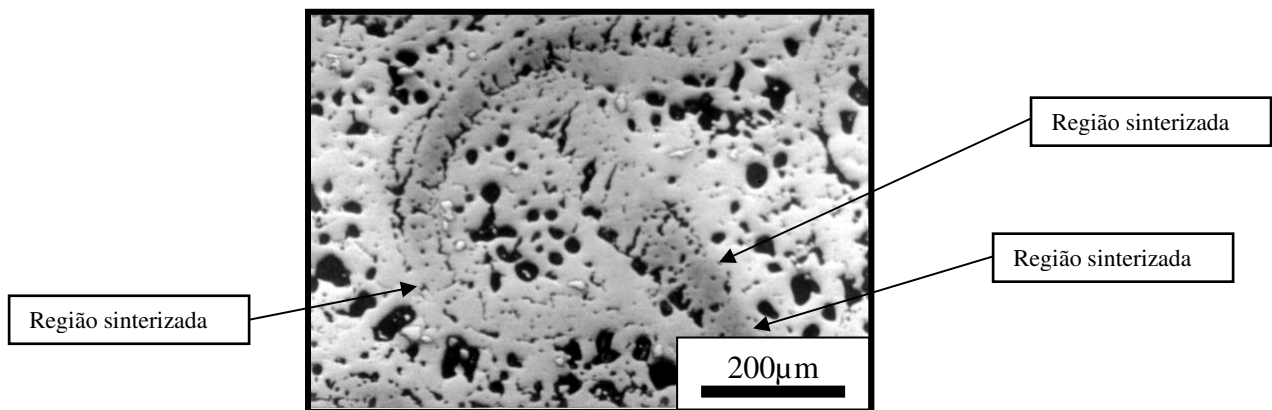


FIGURA 1.4- Mistura de cavaco com pó de cobre e bronze, respectivamente. Observa-se, além de poros, que são inerentes aos materiais sinterizados, regiões de intensa interação metalúrgica entre cavaco de cobre e pó de bronze. Algumas dessas regiões estão apontadas pelas setas.

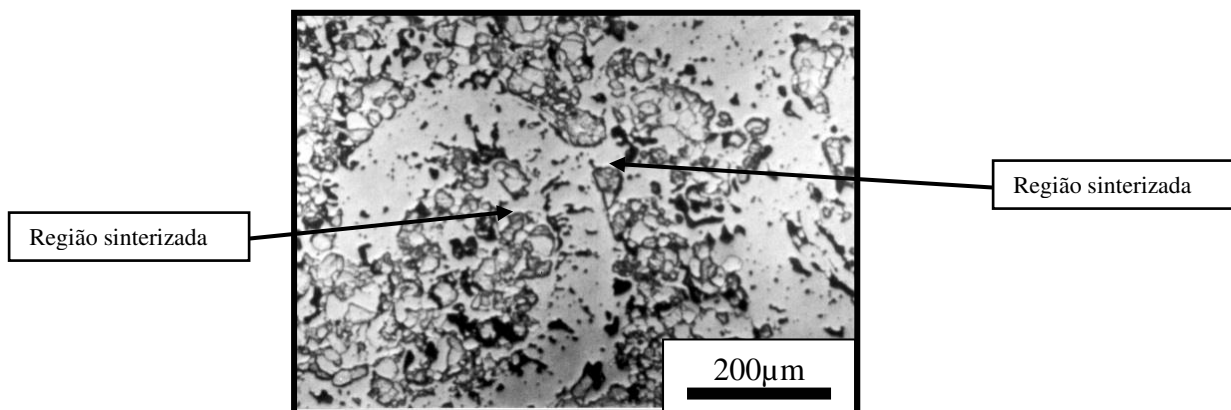


FIGURA 1.5- Mistura de cavaco com pó de cobre. Observa-se, além de poros, que como foi visto, são inerentes aos materiais sinterizados, regiões de interação metalúrgica entre cavaco de cobre e pó de bronze e de ferro. Algumas dessas regiões estão apontadas pelas setas.

Com base nos parâmetros determinados do processo de compactação e de sinterização, publicados recentemente, partiu-se para a fabricação de um ferramental para o desenvolvimento de novos trabalhos, com outros metais mais nobres, custo dos pós, fosse mais elevado. No caso, optou-se pelo pó do aço inoxidável austenítico AISI 316L, objeto central do presente trabalho. O preço no mercado internacional gravita em torno de U\$ 25,00, o quilo [25], sendo muito mais caro do que o pó de ferro e de cobre, cujos preço encontram-se na faixa de U\$ 5,0 e U\$ 8,0 por quilo, respectivamente.

A literatura especializada, informa que existem outras maneiras, não convencionais, de se reciclar cavacos no estado sólido que, no caso da reciclagem de cavaco de ligas de alumínio, são extrudados a quente em pressões que podem variar entre 210 e 400MPa e temperaturas entre 773 e 823K (500 a 550⁰C) [26-28].

Como exemplo de produtos acabados ou semi-acabados pode-se citar os mancais de deslizamento fabricados a partir de cavaco de alumínio e suas ligas que, após serem compactados a frio, são extrudados a quente. É interessante observar que são realizados estudos aprofundados de propriedades tais como o comportamento mecânico e o comportamento tribológico desses materiais que em alguns casos podem ser ligas do tipo alumínio-ferro-cromo [29-31].

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo principal dar ao leitor uma visão generalizada da Metalurgia do Pó, tanto no aspecto evolutivo quanto no aspecto do processamento.

2.1- EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA METALURGIA DO PÓ

Há alguns milhares de anos o homem conheceu o ferro metálico, desenvolvendo a partir daí, objetos, armas e utensílios essenciais à sua sobrevivência. Naquela época, os povos mais desenvolvidos não conseguiam obter calor suficiente para fundir o metal, todavia, utilizavam-se de técnicas de aquecimento e prensagem que possibilitavam a aglomeração de particulados e pelotas de ferro, algo muito semelhante ao processo de sinterização. Por volta de 1.000 a.C. os árabes, os indianos e alguns povos germânicos produziram espadas de altíssima qualidade, para a época, valendo-se de técnicas de obtenção do aço. Eles produziam o pó a partir de pedaços de ferro oxidados que eram juntados, aquecidos e forjados. Esse processo era repetido várias vezes até a eliminação de impurezas e até que os teores de carbono estivessem baixos o suficiente para que o ferro se transformasse em aço [1, 32].

Passaram-se alguns séculos quando esses povos e alguns povos orientais conseguiram finalmente aquecer até temperaturas suficientemente elevadas, a ponto de conseguirem fundir o ferro. Esse fato relegou as "técnicas" da Metalurgia do Pó ao abandono, sendo substituídas pela fusão do ferro e do aço, mais apropriado à época, para a produção em massa. Finalmente, existem registros que mostram que os Incas também utilizaram-se do processo de sinterização para fabricar bijuterias em platina [1, 11, 23, 33].

Por volta do Século XIX, pós metálicos eram obtidos por redução ao hidrogênio para fins farmacêuticos. Pós metálicos obtidos por eletrólise marcaram o início da moderna Metalurgia do Pó, que a partir daí avançou e acompanhou o desenvolvimento tecnológico da humanidade.

A tabela 2.1. apresenta os grandes marcos da Metalurgia do Pó.

TABELA 2.1- Evolução da Metalurgia do Pó através da História da Humanidade.

Aprox. 4.000 a.C.	Armas de ferro , lanças, utensílio, a partir de aglomerados de ferro.
Aprox. 1.200 a.C.	Noções sobre a fabricação de aço, a partir de aglomerados, e seus tratamentos térmicos. Técnicas de cerâmicas metálicas.
400 a 1.300 d.C.	Colunas, lingotes, utensílios diversos, a partir de aglomerados soldados e forjados a fogo. Armas de aço a partir de aglomerados de pós metálicos obtidos por ação mecânica.
1.827	Fabricação de moedas de platina - Sobolevsky, União Soviética.
1.829	Fabricação de platina maleável e moedas - Wollaston, Inglaterra. Essa técnica é, historicamente, considerada a precursora da moderna tecnologia do pó.
1.900	Filamento para lâmpadas de Ósmio - Auer von Welsbacch, Alemanha
1.908	Mancais auto-lubrificantes de ferro poroso - Lowendahl, Inglaterra.
1.909	Filamentos de tungstênio - Coolidge, Inglaterra.
1.920	Bronze poroso para a indústria de automação, em especial a indústria têxtil - Inglaterra.
1.923	Primeiras experiências com pó de cobalto e carbonetos de tungstênio, que representaram um marco histórico da sinterização - Krupp, Alemanha.
1.930	Lançada a marca "widia"- Krupp, Alemanha.
1.930 a 1.936	Pós de ferro carbonila. Primeiras experiências com ferro e aço sinterizados.
A partir de 1.938	Peças estruturais sinterizadas de ferro e aço, mancais porosos, discos de fricção, ímãs permanentes, metalo-cerâmicos e uma infinidade de outras aplicações.

2.2- OPERAÇÕES BÁSICAS NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS SINTERIZADAS

As principais operações na fabricação de peças sinterizadas estão sumarizadas na figura 2.1. [9, 34-35].

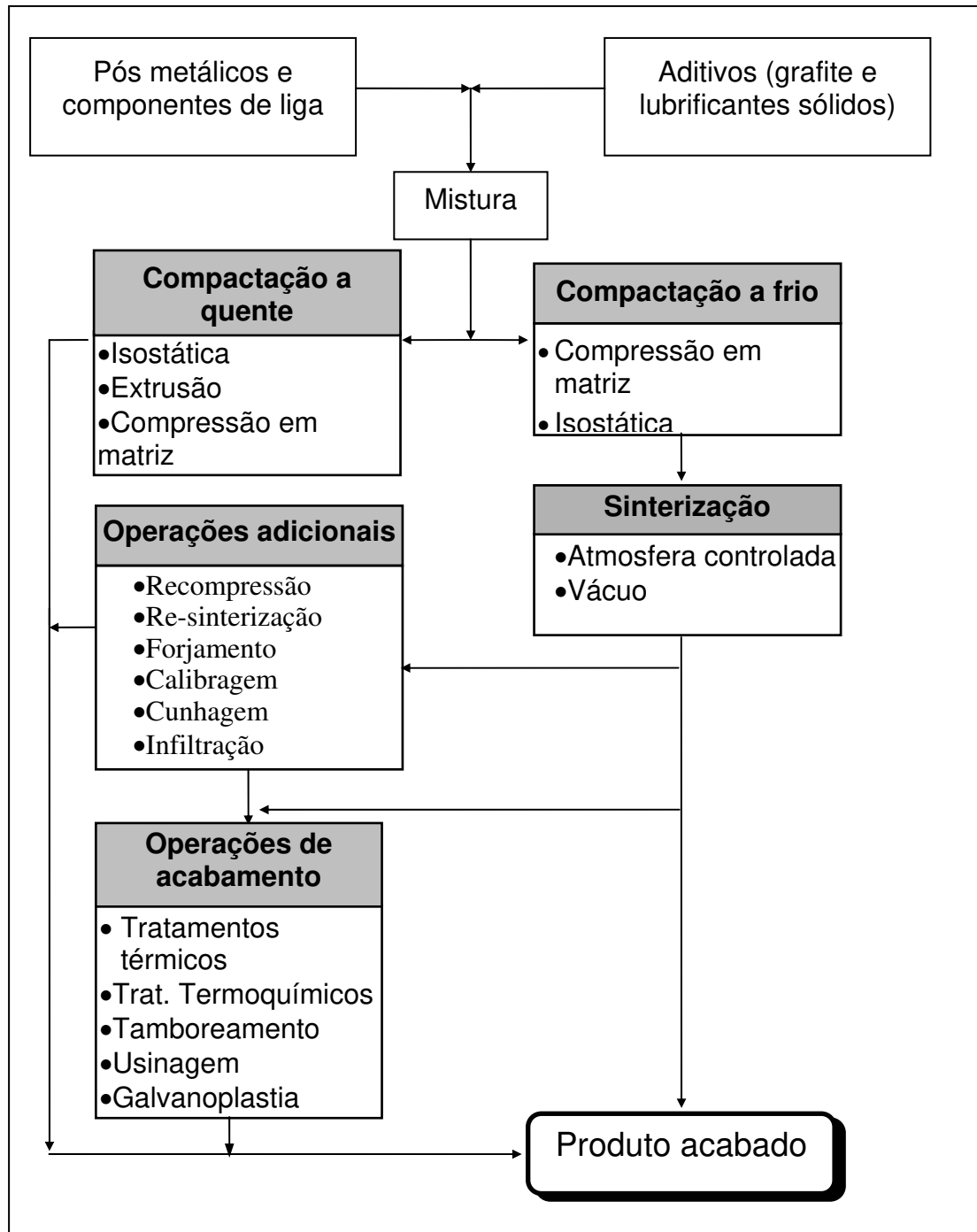


FIGURA 2.1- Principais operações na fabricação de peças metálicas sinterizadas.

2.3- PRODUÇÃO DOS PÓS METÁLICOS

A obtenção dos pós metálicos segue uma única ou uma combinação das seguintes técnicas listada a seguir:

- atomização;
- eletrólise;
- métodos mecânicos: trituração e moagem;
- métodos físico-químicos: pirólise. Por exemplo, obtenção de pós de ferro e níquel de alta pureza;
- métodos químicos: redução de óxidos por hidrogênio ou monóxido de carbono e corrosão. Por exemplo, obtenção de pós de aços inoxidáveis;
- centrifugação com eletrodo rotativo.

A atomização e a eletrólise são os processos mais comumente utilizados. Os outros métodos citados são utilizados para obtenção de pós com características supercontroladas e para aplicações específicas, tais como os pós metálicos utilizados na indústria aeronáutica e aeroespacial, no caso das superligas e das ligas especiais de alumínio e de titânio e partículas nanométricas, além de pós muito finos de aço inoxidável para utilização biomédica em implantes ortopédicos e dentários [34, 36-37].

Recentemente, surgiu uma nova técnica, ainda em estágio experimental, baseada em métodos eletroquímicos para se obter pós muito finos e muito homogêneos. Trata-se da eletrocristalização [38]. A figura 2.2. ilustra pós metálicos de bronze(a) e de estanho(b), evidenciando a morfologia das partículas.

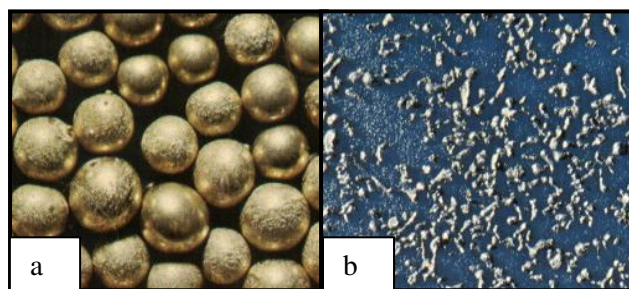


FIGURA 2.2- a) pó de bronze. b) pó de estanho [16].

As partículas esféricas são muito utilizadas na fabricação de filtros metálicos sinterizados utilizados na indústria alimentícia, farmacêutica, química, petroquímica, entre outras [39-41].

2.4- FORNOS DE SINTERIZAÇÃO

Os fornos utilizados para sinterizar os compactados em Metalurgia do Pó são, usualmente, a gás ou por resistência elétrica, com controle da atmosfera.

Os grandes fornos de sinterização são normalmente constituídos de forma a possuírem três regiões distintas [21, 23]:

- zona de pré-aquecimento;
- zona de alta temperatura;
- zona de resfriamento.

A zona de pré-aquecimento, que é destinada à remoção do ar e lubrificantes do compactado, normalmente é controlada para aquecer até cerca de 703K (430⁰C), mas se for desejado, pode ter sua temperatura elevada até em torno de 1173K (900⁰C), dependendo do material a ser sinterizado. Entretanto, compactados de alguns aços inoxidáveis sofrem corrosão nessa faixa de temperatura [42].

É muito importante que todos os lubrificantes, incluindo o estearato de zinco, o estearato de lítio e o ácido esteárico ou parafinas, possam ser volatizados e expelidos do forno antes que os compactados entrem na zona de alta temperatura. Então, a temperatura do forno e o fluxo de gás devem ser suficientes para garantir que isso aconteça. Se hidrocarbonetos, derivados dos lubrificantes, passam para a zona de alta temperatura, eles podem reagir de forma a liberar carbono que irá se depositar nos elementos de aquecimento e refratários do forno, além de descolorir as peças e prejudicar a sua sinterização [47-48]

Os compostos de zinco, por exemplo, irão contaminar os elementos de aquecimento, podendo inclusive passar para a zona de resfriamento, condensando-se sobre as paredes do forno, reduzindo a taxa de transferência de calor.

O tempo de permanência na zona de alta temperatura deve ser o suficiente para que os compactados sejam aquecidos até a temperatura de sinterização e mantidos afim de que ela ocorra. Esse tempo, à temperatura de sinterização, depende das propriedades desejadas do compactado, tais como a densidade, a resistência mecânica ou a resistência ao alongamento. Frequentemente, utilizam-se faixas múltiplas de controle para se obter um gradiente de temperatura adequado.

O tempo de resfriamento tem normalmente um valor tal que os compactados são resfriados com velocidade adequada de modo que não ocorra choque térmico. O ideal é controlar-se, automaticamente, a temperatura da água de resfriamento. Se a temperatura das paredes for resfriada abaixo do ponto de orvalho do gás protetor, pode haver condensação de água que pode depositar-se sobre as peças, causando-lhes manchas, comprometendo-lhes, assim, o aspecto superficial. Se o tempo de resfriamento for insuficiente, os compactados irão se oxidar quando entrarem em contato com o ar, já fora do forno.

Os compactados, normalmente, entram no forno através de transportadores constituídos de esteiras, roletes ou por mecanismos de impulsão.

2.4.1- Sinterização por Fornada

A sinterização por fornada é recomendada quando o número de peças não for muito elevado, como é o caso de laboratórios de pesquisa e a comercialização de pequenos lotes, é realizada em fornos de pequenas dimensões que possibilitam um melhor isolamento do meio externo, ou seja, eles podem ser mais bem lacrados. Nesse caso, é comum a utilização de vácuo e/ou hidrogênio como elemento de proteção atmosférica. Pode-se, portanto, concluir que como o volume é muito menor do que na sinterização em fornos contínuos, e o valor de cada componente sinterizado pode ser muito maior, a opção por uma atmosfera protetora mais onerosa, pode ser viabilizada.

Portanto, no processo por fornada, a tendência é de se optar pela atmosfera ideal, com menor consideração quanto ao seu custo, e muitas vezes a atmosfera escolhida é hidrogênio ou vácuo que podem ser consideradas como atmosferas especiais. Será visto no capítulo 3, em materiais e métodos, que o forno utilizado nos ensaios preliminares do presente trabalho, foi um forno constituído de um tubo de porcelana. Portanto, um forno tubular no qual se injetou argônio puro.

2.4.2- Sinterização em Fornos Contínuos

Nos casos de produção em larga escala, dos produtos sinterizados, é comum um processo contínuo, e grandes volumes de atmosferas protetoras são requeridos.

Ao se determinar a escolha da atmosfera para forno contínuo, é necessário considerar primeiramente o que é que se espera da atmosfera protetora. Nesse tipo de equipamento, podem-se observar três zonas de operação, conforme foi visto.

A primeira zona de operação do forno encontra-se em temperaturas bem menores do que as de sinterização, que no caso do ferro, situa-se tipicamente na faixa de 773 a 873K (500 a 600°C). É nessa zona, que, conforme já foi visto, alguns aditivos e lubrificantes são volatizados e removidos do forno. Como esses elementos são, na sua maioria, compostos orgânicos, deve-se prevenir a deposição de fuligem nas peças que serão sinterizadas e também nas partes internas do forno. É nessa área também necessária a remoção desses compostos, que é realizada com o auxílio de uma significativa corrente de atmosfera protetora.

A segunda zona ou zona de sinterização, em elevadas temperaturas, no caso do ferro, situam-se em torno de 1373K (1100°C), e a atmosfera deve cumprir as exigências descritas anteriormente. Esta deve possibilitar a redução de algumas regiões oxidadas na superfície das partículas. Devido à elevada reatividade a essas temperaturas, ela, a reatividade, é a reação química que, principalmente, irá determinar a atmosfera a ser utilizada, o que será pormenorizado na próxima seção.

A terceira zona é aquela em que o produto tem de ser coletado, num compartimento que irá desempenhar um papel fundamental no resfriamento do sinterizado. Esse compartimento consiste numa região fria, e, ainda, suprida de atmosfera protetora para garantir que não ocorrerá uma adicional alteração química, bem como garantir peças com boa aparência superficial. Portanto, na prática, considera-se que não deve haver oxidação superficial do sinterizado. Desse modo, uma atmosfera redutora com elevada condutividade térmica é recomendada, para se evitar desnecessárias demoras entre as fornadas [52].

Embora todos esses fornos tenham essas três zonas, alguns fornos podem ter por exemplo, uma zona de pré-sinterização para reduzir a oxidação ou difusão de carbono, e alguns podem até ser equipados com uma zona pós sinterização para restauração do carbono. Embora, às vezes, possa ser um fator complicador, o ideal é que a reação química em cada parte do forno seja feita sob atmosfera específica.

2.5- ATMOSFERA PROTETORA PARA A SINTERIZAÇÃO

As atmosferas protetoras são utilizadas em Metalurgia do Pó com os seguintes propósitos [42]:

- prevenir quanto à oxidação;
- reduzir óxidos;
- controlar a carbonetação e descarbonetação.

A oxidação e a descarbonetação dos compactados de aço e de ferro são causadas pelo oxigênio, vapor d'água e dióxido de carbono, quando presentes em proporções elevadas em relação aos teores de hidrogênio e monóxido de carbono. Os óxidos de ferro são redutíveis pelo hidrogênio, monóxido de carbono e carbono. A carbonetação é causada pelo monóxido de carbono e por hidrocarbonetos, tais como o metano [42].

Compactados de cobre e bronze são suscetíveis à oxidação generalizada e ao descoloramento pelo oxigênio. Contudo não são afetados pelo hidrogênio, monóxido de carbono

ou carbono. Já o dióxido de carbono, oxigênio, enxofre e vapor d'água causam um ataque seletivo sobre o zinco do latão [43].

Entre outros, o nitrogênio, o hidrogênio e o argônio são gases de utilização bastante comum em Metalurgia do Pó, como proteção gasosa contra a oxidação e demais ataques superficiais, durante a sinterização. Em particular, esses três gases foram utilizados no presente trabalho, conforme será visto no capítulo 3, nos procedimentos experimentais [44-46].

A sinterização, conforme foi visto anteriormente, é o processo de aglomeração de partículas por aquecimento em forno com atmosfera protetora, em temperaturas de cerca de 70% abaixo do ponto de fusão. No caso da mistura de pós, desde que não se queira uma fase líquida, essa temperatura dar-se-á em relação ao material de menor ponto de fusão [42, 45, 48].

Devido ao fato dos metais serem extremamente reativos em temperaturas elevadas e devido à grande superfície de área exposta do pó ao oxigênio contido no ar, a escolha correta do tipo de atmosfera protetora é de vital importância quanto, com relação ao produto final. No caso, motivado por exigências cada vez mais crescentes com relação à qualidade e ao desempenho dos componentes sinterizados, a tecnologia das atmosferas protetoras tem sido cada vez mais pesquisada e desenvolvida [49-50].

Dependendo do material a ser sinterizado, a atmosfera protetora deve executar algumas ou todas as seguintes funções:

- geralmente, não reagir com o material na temperatura de sinterização ainda que, às vezes, a atmosfera protetora é utilizada para promover uma desejada modificação da composição química do pó sendo processado;
- excluir ar do forno ou dificultar o seu acesso no ambiente de sinterização;
- reduzir algumas regiões do pó, oxidadas, para melhorar o contato metal com o metal;
- remover física ou quimicamente, volatizando o lubrificante e aditivos, oriundos do processamento que precede a sinterização (compactação, acomodação dos pós), do interior do forno.

A escolha da atmosfera é determinada pelo material a ser processado. Obviamente, deve-se avaliar a capacidade de a atmosfera cumprir os itens citados anteriormente, segurança e disponibilidade devem também ser considerados. O valor comercial do produto sinterizado é também um fator determinante na escolha da atmosfera protetora.

É interessante notar que em algumas ocasiões, é desejável que ocorra a oxidação das peças. Normalmente, essa oxidação é promovida para que se crie uma superfície passivadora. Também, pode-se desejar ter superfícies oxidadas, como é o caso de metais sinterizados de utilização artística [51].

2.5.1- Seleção da Atmosfera Protetora

O grande volume de todos os produtos sinterizados, é predominantemente de ferro, cobre, alumínio e aços inoxidáveis, igualmente metais nobres sendo produzidos em volumes menores.

Outros materiais podem ser classificados no grupo dos sinterizados: materiais refratários tais como o molibdênio e o tungstênio. Existem ainda os sinterizados compostos de um ou mais materiais, sendo que aquele de menor ponto de fusão, geralmente forma uma fase líquida, como é o caso das pastilhas de metal duro tais como a *widia*. Esses últimos possuem alto poder de liga e elevada resistência mecânica baseada no ferro ou níquel e existem ainda os materiais porosos que compõem os filtros sinterizados e os mancais auto-lubrificantes [42].

Para todos esses materiais, as atmosferas protetoras disponíveis vão desde o hidrogênio, vácuo e atmosferas sintéticas, às mais econômicas de serem produzidas, tais como as atmosferas exotérmicas e as endotérmicas, que podem ser selecionadas, desde que quimicamente compatíveis com os materiais envolvidos.

As reações que ocorrem comumente no interior do forno, durante a sinterização, são:

$M_x + H_2 \rightleftharpoons XM + H_2O$, nesse caso, ocorre a redução de óxidos metálicos;

$O_2 + 2H_2 \rightleftharpoons 2H_2O$, quando há entrada de ar;

$CO \rightleftharpoons CO_2 + C$ e $H_2O + C \rightleftharpoons H_2 + CO$, no caso de haver a presença de carbono.

Para materiais onde o nível de carbono está presente em teores muito pequenos ou em níveis abaixo do crítico, uma atmosfera composta de nitrogênio e hidrogênio é conveniente para ser utilizada como atmosfera protetora, durante a sinterização. Será visto no capítulo 3, nos procedimentos experimentais, que essa mistura de gases, hidrogênio e nitrogênio, foi utilizada na fase mais importante do presente trabalho. A porcentagem de hidrogênio necessária é a requerida para se ter um potencial de redução suficiente para reduzir alguns metais oxidados e oxigênio presentes, e, também, para prevenir alguma oxidação de componentes do forno.

O potencial de oxidação da atmosfera pode ser calculado com o auxílio de equações específicas, e esse procedimento foge ao escopo deste trabalho e, portanto, não será apresentado. A quantidade de vapor d'água que irá se formar é proporcional à quantidade de hidrogênio disponível, a tabela 2.2 nos fornece a quantidade de água em função do ponto de orvalho da atmosfera protetora. Na prática, devido ao elevado custo do hidrogênio, se comparado ao do nitrogênio, e, também por razões de segurança, o teor de hidrogênio presente na atmosfera protetora é mantido nos menores níveis possíveis. Atmosferas típicas contêm 2% de hidrogênio em nitrogênio para ligas de cobre; 10% de hidrogênio para ligas de níquel, e 30% de hidrogênio para aços inoxidáveis. Os aços inoxidáveis costumam formar nitretos, o que, às vezes, representa um problema, levando à sinterização numa atmosfera de hidrogênio puro.

Embora essas atmosferas ofereçam resultados aceitáveis, inclusive o nível de hidrogênio pode oferecer vantagens, por exemplo, uma elevação no limite de resistência devido ao aumento na redução de óxidos. O argônio também é uma alternativa e pode ser utilizado no lugar do nitrogênio. Apesar de ser menos reativo, ele não é usualmente utilizado devido ao seu elevado custo.

TABELA 2.2 – Volume percentual de água, presente em diversos pontos de orvalho.

PONTO DE ORVALHO [°C]	VOLUME DE ÁGUA [%]
-80	0,00005
-60	0,00106
-50	0,00388
-40	0,01270
-30	0,03760
-20	0,10200
-10	0,25700

Embora o hidrogênio sozinho seja neutro em relação ao carbono, é possível que o potencial de oxidação da atmosfera seja suficientemente elevado para oxidar o carbono. Como a atmosfera nitrogênio-hidrogênio não tem a capacidade de carbonetação, para se obter um potencial carbônico, é possível se criar uma base carbônica com a finalidade de se suprir o ambiente de sinterização, em carbono.

O mais recomendado, para se conseguir uma atmosfera carbonetante, é a adição de monóxido de carbono, porque é possível a reação reversível dele com o dióxido de carbono e carbono. Níveis de quantidade de dióxido de carbono e monóxido podem dar o potencial carbônico, e, se necessário, o potencial carbônico pode ser aumentado por uma nova adição de um hidrocarboneto do tipo :



Os controles alternativos de potencial carbônico da atmosfera protetora podem ser obtidos somente pela adição de hidrocarbonetos, geralmente metano ou propano. Em todo caso, na prática, o controle com precisão absoluta do teor de carbono contido na atmosfera protetora é difícil de se conseguir [45].

2.6- OBTENÇÃO DE ATMOSFERA PROTETORA

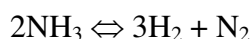
Qualquer atmosfera protetora utilizada pode ser obtida a partir de dois caminhos: primeiramente e, talvez tradicionalmente, pode ser gerada *in loco*, dentro do forno de sinterização. Ou então, cada componente da atmosfera pode ser liberado de tanques de armazenamento através de tubulações e serem misturados para, em seguida, serem introduzidos no forno. Nesse caso, teremos a denominada atmosfera sintética[48, 49].

2.6.1 - Atmosferas Geradas *in loco*

Embora seja possível, excepcionalmente, gerar hidrogênio ou uma mistura hidrogênio-nitrogênio, dentro do forno, essa maneira de obtenção de atmosferas protetoras para sinterização, na prática, não é usual. A geração mais comum de atmosferas protetoras são as enumeradas a seguir:

2.6.1.1 - Amônia Dissociada (DA)

No presente trabalho, mais precisamente, foi especificada uma atmosfera com cerca de 75% hidrogênio e 25% nitrogênio, produzida a partir da dissociação, ou seja, do craqueamento da amônia anidra. Esse procedimento é largamente utilizado nos processos de sinterização. Se a amônia for aquecida na presença de um catalisador, geralmente o ferro, ela é dissociada de acordo com a reação:



Caso a operação de dissociação for corretamente realizada, como resultado, obtém-se uma mistura extremamente seca, com ponto de orvalho próximo de 223K (-50°C) e que contém uma quantidade insignificante de resíduos de amônia. A principal limitação é que a composição da mistura é estável, e a presença do nitrogênio pode resultar na redução das propriedades mecânicas de alguns materiais, particularmente nas do aço inoxidável que, como foi visto, produz nitretos.

O gás produzido é então resfriado numa “camisa d’água” e limpo num purificador ou peneira molecular, podendo passar por um secador para que o excesso de água seja eliminado.

Em determinados níveis, a amônia é tóxica e inflamável, devendo ser manipulada com critério. A tabela 2.3 exhibe, meramente de maneira ilustrativa, os efeitos fisiológicos provocados pela amônia dissociada, *versus* a sua concentração na atmosfera.

TABELA 2.3 – Efeitos provocados pela amônia dissociada, em função da sua concentração no ambiente de trabalho.

PPM NO AR	EFEITOS FISIOLÓGICOS
20	Pequena concentração, pode ser detectada pelo odor
100	Máx. concentração permissível p/ exposições prolongadas
300 a 500	Máx. concentração permissível p/ curtas exposições(1/2 hora)
400	Imediata irritação na garganta
700	Imediata irritação nos olhos
1700	Causa forte tosse
2.500 a 4.500	Perigoso em curta exposição
5.000 a 10.000	Fatal em curtas exposições

2.6.1.2 - Atmosfera Endotérmica (RX)

As atmosferas endotérmicas, também conhecidas como atmosfera RX, são utilizadas para a proteção de peças de ferro e de aço-carbono, nos processos de sinterização. A atmosfera é colocada no gerador endotérmico pela passagem do hidrocarboneto, que em geral é o gás natural ou o propano, através de um catalisador, geralmente de níquel, aquecido até a faixa que vai de 1252 a 1313K (980 a 1040 °C). A relação da mistura é de 1m³ de combustível para 7 a 12 m³ de ar, o que é uma quantidade de ar suficiente para que ocorra a combustão incompleta. Após a passagem pelo catalisador, os gases sofrem um resfriamento rápido para temperaturas, na faixa de 623K (350 °C) para produzir o mínimo possível de CO₂ e de vapor d'água, com a finalidade de se minimizar a formação de fuligem. Quando gás natural é utilizado como gerador de atmosfera protetora para estocagem de abastecimento, a atmosfera resultante é tipicamente:

40%H₂; 20%CO; 0,5%CO₂

No caso de se utilizar o propano, a atmosfera resultante é:

31% H_2 ; 23% CO ; 0,5% CO_2

O equilíbrio do potencial de carbono das atmosferas endotérmicas, na temperatura normal de sinterização, é em torno de 0,2%C. Isso não é necessariamente significativo quanto à descarbonetação dos aços de médio e de alto carbono, pois essa composição fornece um elevado potencial carbônico nas temperaturas mais baixas. Contudo, se um elevado potencial carbônico for necessário, pequenas adições de gás natural ou de hidrocarbonetos podem ser realizadas.

2.6.1.3 - Atmosferas Exotérmicas (DX)

Atmosferas exotérmicas ou DX são produzidas pela combustão completa do hidrocarboneto de maneira similar ao processo utilizado na produção da atmosfera endotérmica. Porém, nesse caso, a quantidade de ar fornecida situa-se na faixa de 13 a 23m³ para 1m³ de combustível, é suficiente para que ocorra combustão completa sem que exista a necessidade de utilizar-se um catalizador pois nesse caso, a reação que se desenvolve é tipicamente exotérmica. O procedimento mais comum, para se obter esse tipo de atmosfera protetora, consiste em se fazer passar o combustível por uma retorta mantida a aproximadamente 1273K (1000⁰C). O gás obtido é então resfriado com a finalidade de se remover a fuligem. A atmosfera resultante possui a seguinte faixa de composição:

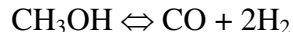
2-15% H_2 ; 2-12% CO ; 6-12% CO_2

Na prática o ponto de orvalho é reduzido para aproximadamente 278K (5⁰C) pelo gás refrigerante. No entanto, por causa dos altos índices de CO_2 , um gás exotérmico é comumente utilizado na sinterização dos aços, podendo perfeitamente ser utilizado na sinterização do cobre e suas ligas.

2.6.1.4 - Atmosferas Sintéticas

Outras atmosferas protetoras podem ter a sua composição mais bem controlada. São as denominadas “atmosferas sintéticas”. Esse tipo de atmosfera protetora pode ser armazenado em tanques apropriados, próximos aos locais aonde serão utilizados. Embora, volume por volume os preços dessas atmosferas sintéticas possam ser mais elevados do que o preço dos gases gerados, essa desvantagem é geralmente compensada pela flexibilidade e simplicidade de manuseio que eles oferecem. As atmosferas de nitrogênio-hidrogênio podem ser fornecidas ao forno na dosagem desejada, através do ajuste da mistura, por intermédio de um painel de controle. Hidrocarbonetos podem ser fornecidos do mesmo modo. Entretanto, se fosse necessária a adição de metano, o fornecimento seria, normalmente, a partir do gás natural. Uma constatação interessante é que, na prática, a composição tanto do endogás quanto a do exogás são muito difíceis de serem controladas.

O monóxido de carbono é muito pouco viável em quantidades comerciais. Então se a atmosfera de nitrogênio/hidrogênio/monóxido de carbono é requerida, ela poderá ser obtida pela dissociação do metanol no interior do forno, de acordo com a equação:



De modo semelhante ao endogás, adições de hidrocarbonetos podem ser realizadas, se necessário. O metanol, como elemento principal na atmosfera protetora, é mais fácil de ser controlado do que a atmosfera gerada. Estudos comparativos têm mostrado que a composição e as propriedades de produtos sinterizados, em atmosfera de metanol, mostram menores variações em suas características do que os produtos sinterizados em atmosfera endotérmica.

A principal vantagem dessas atmosferas sintéticas é que elas podem oferecer a facilidade de se injetar as diferentes misturas gasosas nas diferentes zonas do interior do forno. Por exemplo, pode ser visto que a leve oxidação superficial, provocada pela atmosfera utilizada na zona de queima do lubrificante, é incompatível com a da atmosfera redutora, observada na zona de sinterização.

Quando a opção for utilização de atmosferas geradas, é necessário contar com movimentos físicos da atmosfera para remover lubrificantes. Porém, embora e além dessas

aplicações de atmosferas sintéticas, a sua composição pode ser modificada na zona de queima do lubrificante para facilitar na remoção dos fumos, com o auxílio de recursos químicos, o que pode ser feito mediante a adição de nitrogênio umedecido, nesta zona.

O conceito de abastecimento de diferentes misturas para diferentes zonas do forno, possibilita a chance de cada produto ser individualmente considerado e corretamente utilizado. Esse conceito pode dar a melhor possibilidade nas condições de sinterização, possibilitando uma maior racionalização no uso das atmosferas protetoras, do ponto de vista econômico. Outra vantagem é que, como geralmente, a sinterização requer atmosferas neutras, atmosferas sintéticas, que geralmente contém mais nitrogênio do que nas atmosferas geradas, são menos reativas devido à disponibilidade de redução da quantidade dos componentes ativos. A tabela 2.4 exibe a composição de atmosfera endotérmica, em diversas condições.

TABELA 2.4 – Composição de atmosfera endotérmica, em diversas condições [42].

	% DE ATMOSFERA ENDOTÉRMICA, NA MISTURA			
	100%	60%	30%	20%
H ₂ [%]	35,50	24,50	13,80	10,80
CO [%]	18,30	10,70	6,70	5,50
O ₂ [%]	0,47	0,28	0,15	0,12
PONTO DE ORVALHO[°C]	-8	-25	-37	-40
TAXA DE FULIGEM	1,00	1,20	2,00	1,00
CARBONO [%]	0,60	0,55 – 0,60	0,50 – 0,55	0,60

A seguir será apresentado o capítulo 3, onde serão tratados os materiais e a metodologia experimental utilizados neste trabalho.

CAPÍTULO 3

3.1- MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais que foram utilizados assim como a metodologia experimental empregada.

3.1.1- Procedimento para geração dos cavacos

Este item trata do procedimento experimental empregado para a geração dos cavacos que foram utilizados na confecção dos corpos-de-prova, compactados e sinterizados pela Metalurgia do Pó, utilizados neste trabalho. Antes do propósito de se conseguir gerar uma boa quantidade de cavacos adequados a esta pesquisa, um estudo sobre teoria de formação de cavaco foi empreendido. A principal meta foi compreender o processo de usinagem para se ter o máximo controle sobre o tipo, forma e dimensões dos cavacos gerados. Portanto, é apresentada na sequência uma mescla entre os fundamentos teóricos centrais sobre cavacos e o procedimento experimental adotado para tal finalidade.

Os cavacos gerados nos processos de usinagem podem ser classificados segundo três tipos: contínuo, de cisalhamento e de ruptura. O primeiro se caracteriza por lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupada. O segundo tipo apresenta a mesma configuração, porém as lamelas são mais definidas e estão parcialmente soldadas ao longo do cavaco. Já o terceiro tipo tem como característica principal a ruptura completa dos segmentos lamelares. Os cavacos também podem ser diferenciados quanto à sua forma, que podem ser em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços [50, 67]. Essas formas são ilustradas na figura 3.1.



FIGURA 3.1- Diferentes formas que os cavacos assumem quando são gerados durante operações de torneamento. (a) fita, (b) helicoidal, (c) espiral e (d) em lascas.

Para operações de usinagem, os cavacos da classe (a) e (b) são considerados indesejáveis pois eles possuem baixa densidade efetiva, ocupam muito espaço e causam problemas econômicos no manuseio, descarte e reaproveitamento. Além disso, podem enrolar-se em torno da peça, da ferramenta ou de componentes da máquina. Com temperaturas elevadas e arestas afiadas, representam um grande risco para o operador do equipamento. Ao se enrolarem na peça, causam danos na superfície usinada e impedem o acesso adequado do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta.

Como se nota, mesmo em processos industriais de usinagem, além da peça acabada, o que se busca são cavacos de formas espirais ou lascados. No presente trabalho, não se considera o produto usinado, mas sim os cavacos gerados a partir dele.

Dentre os parâmetros de usinagem que influenciam no processo de formação dos cavacos, são destaque o avanço da ferramenta (f), a profundidade de usinagem (a_p) e a velocidade de corte (v_c). As variáveis mais determinantes no desempenho da ferramenta de corte, no tipo e forma do cavaco são o ângulo de posição (κ_r), ângulo de saída (γ) e o emprego de quebra-cavaco [69]. Este último tem sido fortemente utilizado, uma vez que as melhorias nas ferramentas de corte e nas máquinas-ferramentas têm favorecido a formação de cavaco helicoidal ou em fita, principalmente pelo aumento de v_c . Daí, a alternativa é recorrer à quebra mecânica do cavaco por flexão.

O cavaco somente quebra quando atinge a sua deformação crítica (ϵ_f), que se relaciona às propriedades mecânicas do material da peça, à curvatura (r_c) e espessura (h') do próprio cavaco [70].

Sendo assim, após uma pesquisa na literatura técnica e científica sobre o assunto, verificou-se que as condições necessárias para promover a quebra dos cavacos gerados pelo torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 316L são: elevado ângulo de posição da ferramenta, emprego de quebra-cavaco e ângulo de saída negativo, elevado avanço e baixa velocidade de corte. O efeito da profundidade de usinagem na formação do cavaco é ainda considerado incerto e, por esse motivo, foi testada mais de uma opção. Todos esses fatores aplicados conjuntamente favorecem a obtenção adequada de cavaco do tipo *ruptura* e formato *em lascas*.

De posse dos conceitos de formação de cavaco extraídos da literatura, partiu-se para a especificação do inserto e do suporte que atendessem a esses requisitos técnicos. A empresa Sandvik Coromant foi escolhida por apresentar uma variedade de opções de ferramental e um grande alcance no mercado. Portanto, foi especificado o inserto de código SNMG 12 04 08 MR GC 2035, cujas características são: formato quadrado com 12 mm de lado, 4 mm de espessura, dupla face e raio de ponta (r_e) de 0,8 mm. Essa pastilha apresenta revestimento de TiN e boa resistência a choques térmicos e mecânicos. É própria para operações de desbaste leve a pesado de aços inoxidáveis. A figura 3.2 ilustra a geometria do quebra-cavaco e as dimensões do inserto.

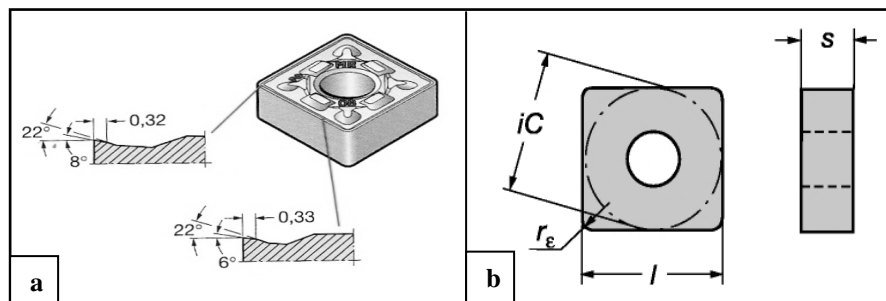


FIGURA 3.2- (a) Dimensões e geometria do quebra-cavaco e (b) medidas principais da pastilha, sendo $iC=12$ mm, $r_e=0,8$ mm, $l=12$ mm e $s=4$ mm.

O suporte destinado à fixação do inserto de metal duro foi especificado sob o código DSBNL 25 25 M 12. Trata-se de um suporte esquerdo (avanço somente pela esquerda) com fixação rígida da pastilha por grampo, ângulo de posição (κ_r) de 75° , ângulo de saída (ϕ) de -6° e ângulo de folga (α) de 6° . A figura 3.3 exibe um esquema do suporte com as suas principais medidas.

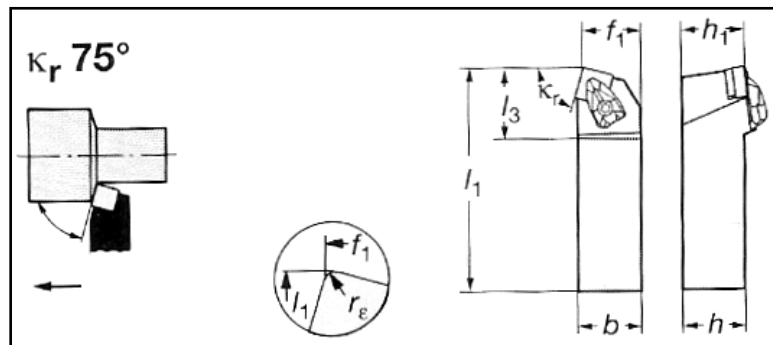


FIGURA 3.3- Suporte para o inserto quadrado especificado. As medidas são: $l_1=150$ mm, $f_1=22$ mm, $b=h=h_1=25$ mm e $l_3=34,3$ mm

Tendo sido especificado o ferramental completo, finalmente partiu-se para a escolha dos parâmetros de corte que atendessem, simultaneamente, aos requisitos da ferramenta, fornecidos no catálogo do fabricante, e aos propósitos deste trabalho, de gerar cavacos de ruptura lascados. A seguir, a tabela 3.1 resume e compara os parâmetros de corte de catálogo, e os adotados para este trabalho. Vale ressaltar que os parâmetros são indicados para a usinagem do aço inoxidável austenítico AISI 316L, com dureza de 180 HB, considerado na condição *como recebido*.

TABELA 3.1- Parâmetros de corte recomendados pela empresa Sandvik Coromant e adotados.

Parâmetros de Corte	Recomendados	Adotados
Profundidade de usinagem [mm]	1,5 a 8,0	1,5
Avanço [mm/rot]	0,35 a 0,70	0,50
Velocidade de corte [m/min]	115 a 170	115

Finalmente, o procedimento para geração dos cavacos foi simples. Um tarugo de 6,25mm de diâmetro foi fixado no sistema da placa universal de um torno mecânico horizontal da marca NARDINI e modelo MASCOTE, com 3,5 HP de potência. Após a devida fixação do tarugo, os parâmetros de corte adotados na tabela 3.1 foram inseridos no comando do equipamento para efetivar a remoção de cavaco. Estes foram coletados em bandeja, limpos e secados, para compactação e posterior sinterização, conforme o detalhamento que será apresentado no item 3.2.1. Vale lembrar que foi aplicado fluido de corte emulsionável em abundância, uma vez que o aço inoxidável, especialmente o austenítico, possui alta taxa de encruamento e baixa condutividade térmica, o que provoca altas temperaturas na zona de cisalhamento primária e secundária do cavaco. No caso dos cavacos obtidos com a serra mecânica alternativa, fixou-se uma pressão média de corte com serra de 0,63 dentes por milímetro (16 dentes por polegada), conforme pode ser observado na figura 3.4.

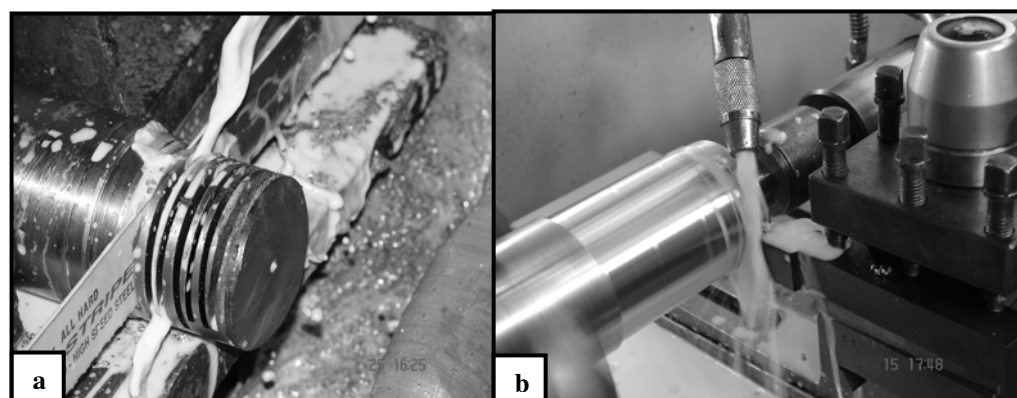


FIGURA 3.4- Geração do cavaco. a) Utilizando serra mecânica alternativa; b) Em torno mecânico.

3.2- MISTURA DOS PÓS COM CAVACOS, COMPACTAÇÃO, SINTERIZAÇÃO E ENSAIOS DOS CORPOS-DE-PROVA

3.2.1- Mistura dos pós com cavacos

Nessa fase do trabalho, foram preparadas as misturas de cavacos de aço inoxidável austenítico AISI 316L e pó do mesmo material, comercialmente puro. O pó de aço inoxidável foi

fornecido pela METALPÓ Ind.. e Com., de São Paulo-SP. Uma parte do cavaco foi obtido, de um tarugo de aço inoxidável austenítico AISI 316L, de 6,25 mm de diâmetro através de serra mecânica, e a outra parte foi obtida através de usinagem em torno mecânico convencional conforme foi descrito no item anterior, o item 3.1. Nas tabelas 3.2 e 3.3, são apresentadas as características de composição química e, respectivamente, a distribuição granulométrica do pó de aço inoxidável AISI 316L utilizado neste trabalho.

TABELA 3.2 – Composição química nominal do aço inoxidável austenítico AISI 316L – [Tanto o pó quanto o cavaco têm a mesma composição química].

AISI	C (%)	Mn[máx](%)	P[máx](%)	S[máx](%)	Si[máx](%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo(%)
316L	0,03	2,00	0,045	0,030	1,00	17,50	12,50	2,50

TABELA 3.3 – Distribuição granulométrica do pó de aço inoxidável austenítico AISI 316L.

MALHA ASTM	MÍNIMO	MÁXIMO
+100	-	3
+150	8	12
+325	32	36
-325	35	45

O estearato de lítio foi utilizado como lubrificante sólido. O cavaco passou por um processo de limpeza com uma solução de 25% de acetona, 25% de álcool etílico, 15% de ácido oléico e 2% de ácido nítrico, dissolvidos em 33% de água destilada com o objetivo de promover a limpeza e a retirada de restos de fluido de corte.

O pó utilizado na confecção das amostras, juntamente com o cavaco, passaram por um processo de secagem em estufa, em temperatura de 75°C, durante 7 horas. Após o resfriamento, esse material foi dividido em várias amostras que continham de 0% a 25% em peso, com uma variação de 5% de cavaco adicionado ao pó, o que totalizava cerca de $15 \pm 0,3$ g para cada uma, para a realização da análise metalográfica e dos ensaios de ruptura transversal em três pontos.

Feito isso, foi misturado a cada grupo, separadamente, cerca de 1,0% em peso de estearato de lítio em misturador Y, conforme pode ser observado na figura 3.5, a uma rotação de 60 rpm, por um período de 40 min, que é o tempo suficiente para se garantir uma boa homogeneização

das misturas. Nesse caso, como pode ser observado na figura 3.5, o misturador Y foi instalado num torno mecânico comum, o que facilitou, e muito, o controle da rotação do misturador.

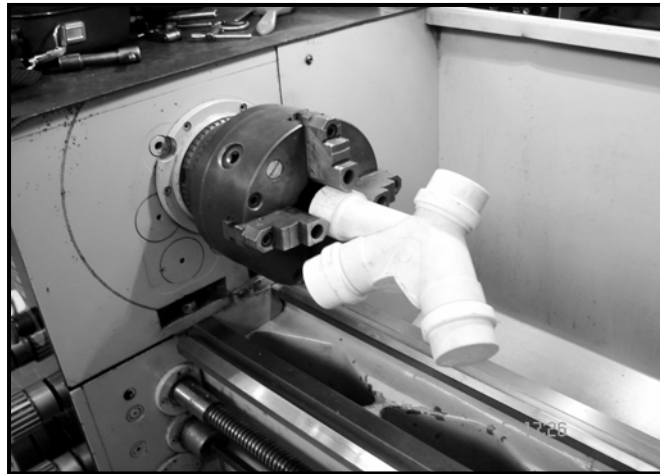


FIGURA 3.5- Misturador Y instalado num torno convencional.

Nesta altura do trabalho, houve a necessidade de se definir qual seria a pressão de compactação a ser utilizada. A pressão de compactação, de 600MPa, foi definida a partir de uma série de ensaios preliminares cujos resultados estão apresentados no próximo capítulo, o capítulo 4, em resultados e discussão. As amostras para esses ensaios preliminares, que continham 20% em peso de cavaco, foram compactadas nas pressões de 400, 450, 500, 550 e 600MPa, em grupos de três, para cada condição de compactação, totalizando 15 amostras. Feito isso, essas amostras foram sinterizadas, utilizando-se um forno tubular da marca QUIMIS, a 1473K (1.200⁰C) sob atmosfera protetora composta de argônio puro. Essas 15 amostras foram ensaiadas à flexão apoiadas em três pontos, no suporte esquematizado na figura 3.9 e instalado na mesma prensa que foi utilizada para a compactação desses corpos-de-prova. A análise dos resultados obtidos desses ensaios preliminares revelou que a pressão de compactação ótima situou-se entre 550 e 600 MPa. Nesse caso, decidiu-se que a pressão de compactação dos corpos-de-prova que seriam utilizados no presente trabalho seria de 600MPa, ou seja, 250kN aplicados em uma área de 4,20 cm².

3.2.2- Compactação dos corpos-de-prova

Para realizar a compactação dos corpos-de-prova projetou e construiu-se uma matriz flutuante em aço VILLARES – VM40, temperada e revenida a 553K (280°C). Para lubrificação da cavidade da matriz e dos punções, utilizou-se uma solução contendo 10% de estearato de zinco e 90% de acetona. Os corpos-de-prova foram compactados em forma de pequenos paralelepípedos na matriz, exibida na figura 3.6, adaptada a numa prensa hidráulica convencional da marca SOLITEST – CT 750, com capacidade de até 1200 kN (120 toneladas).

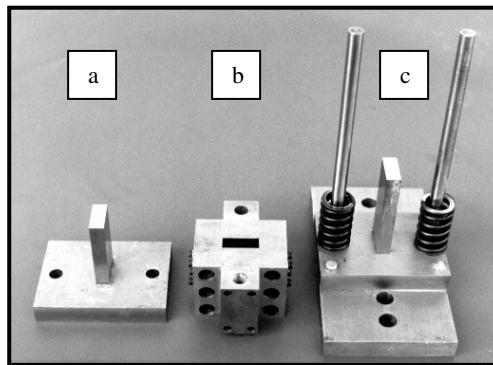


FIGURA 3.6- Matriz flutuante utilizada na compactação dos corpos-de-prova. (a) Punção superior; (b) cavidade da matriz; (c) base da matriz, guias, molas de reação e punção inferior.

A carga de compactação, conforme já foi citado anteriormente, foi de 250kN (25 toneladas) em uma área de praticamente 4,20cm². Portanto, a pressão de compactação ficou muito próxima de 600 MPa.

3.2.3- Sinterização dos corpos-de-prova

A sinterização dos corpos-de-prova foi realizada de batelada em forno industrial contínuo da METALPÓ Ind. e Com., com uma atmosfera protetora composta de aproximadamente 75% de nitrogênio e 25% de hidrogênio. Primeiramente, fez-se um pré-aquecimento das amostras a uma temperatura de 623K (359°C), por um período de uma hora, com o objetivo de realizar a queima do estearato de lítio e evitar empenamentos[65]. Em seguida, a temperatura foi elevada lentamente até 1473K (1200°C), por uma hora. As amostras permaneceram nesta temperatura por um período de quarenta minutos, seguido de resfriamento lento por cerca de uma hora até a temperatura ambiente de aproximadamente 300K (27°C).

Os corpos-de-prova sinterizados foram preparados e analisados de acordo com as técnicas da metalografia convencional em bancada metalográfica Neophot 21, dotada de uma câmera fotográfica digital. Desses ensaios foram obtidas fotomicrografias que possibilitaram a observação das regiões entre o pó metálico e os cavacos, efetivamente sinterizadas, além de uma série de tomadas realizadas a partir de um microscópio eletrônico de varredura Leo 440i, realizadas na Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP de Campinas [60].

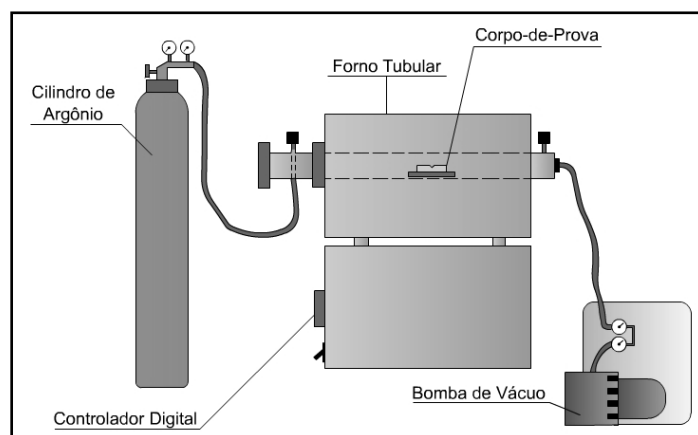


FIGURA 3.7- Esquema do sistema utilizado para a sinterização dos corpos-de-prova de aço inoxidável austenítico 316L, para os ensaios preliminares. Trata-se do forno tubular, cilindro de argônio utilizado como gás protetor contra a oxidação, bomba de baixo vácuo.



FIGURA 3.8- Forno utilizado para a sinterização dos corpos-de-prova, na fase dos ensaios preliminares.

3.2.4- Ensaios de flexão em três pontos

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados no DEMA-FEM-UNICAMP, numa máquina de ensaios universal servo-hidráulica MTS modelo Test Star II, com capacidade de até 100 kN, regulada para aplicar 100 N/s, a partir da qual foram obtidas as curvas da carga em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga, apresentadas no próximo capítulo, em Resultados e Discussão[51].

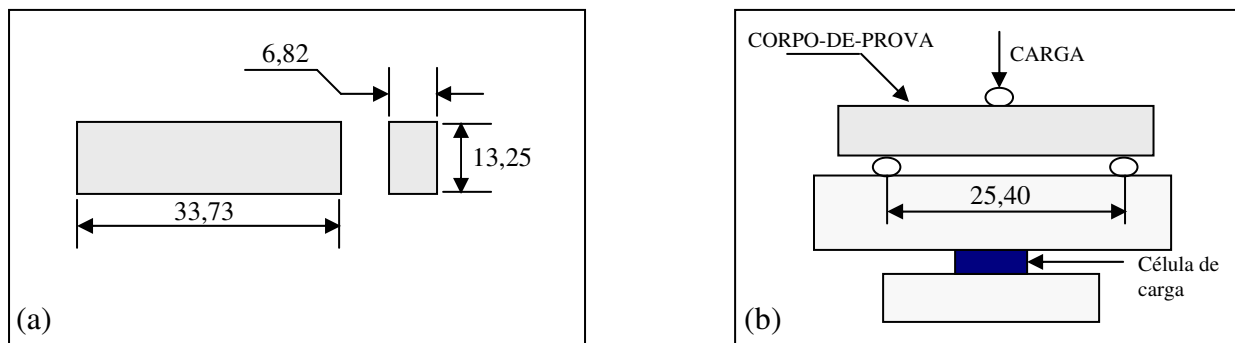


FIGURA 3.9- (a) Dimensões dos corpos-de-prova; (b) desenho esquemático representando o suporte de corpos-de-prova, utilizado nos ensaios preliminares de flexão em três pontos. A distância entre os pontos de apoio foi de 25,4mm (1,0 polegada).

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios preliminares realizados para se determinar qual seria a pressão de compactação mais adequada, e também são apresentados os resultados dos ensaios definitivos.

CAPÍTULO 4

4.1- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados os resultados e discutidos na seguinte seqüência: (a) resultados dos ensaios preliminares para a determinação da pressão de compactação de 600MPa; (b) discussão e conclusão dos ensaios preliminares; (c) resultados dos ensaios definitivos de flexão em três pontos; (d) curvas médias das condições de ensaio; (e) discussão dos ensaios de flexão; (f) resultados dos ensaios de microscopia óptica e eletrônica de varredura; (g) discussão dos resultados de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

4.1.1-Resultados dos Ensaio Preliminares de Flexão em Três Pontos

Conforme já foi citado anteriormente no capítulo três, e escolha definitiva da pressão de compactação dos corpos-de-prova utilizados no presente trabalho, foi realizada com base em vários ensaios preliminares, variando-se a pressão de compactação, da seguinte maneira: 400; 450; 500; 550 e 600MPa. Foram realizados três experimentos para cada uma destas condições. A porcentagem em peso de cavaco do aço inoxidável austenítico AISI 316L foi fixada em 20% para todas as condições de pressão de compactação. Os resultados desses ensaios preliminares estão exibidos nos gráficos que se seguem, sendo que, a cada três gráficos é apresentado um gráfico que representa a média desses.

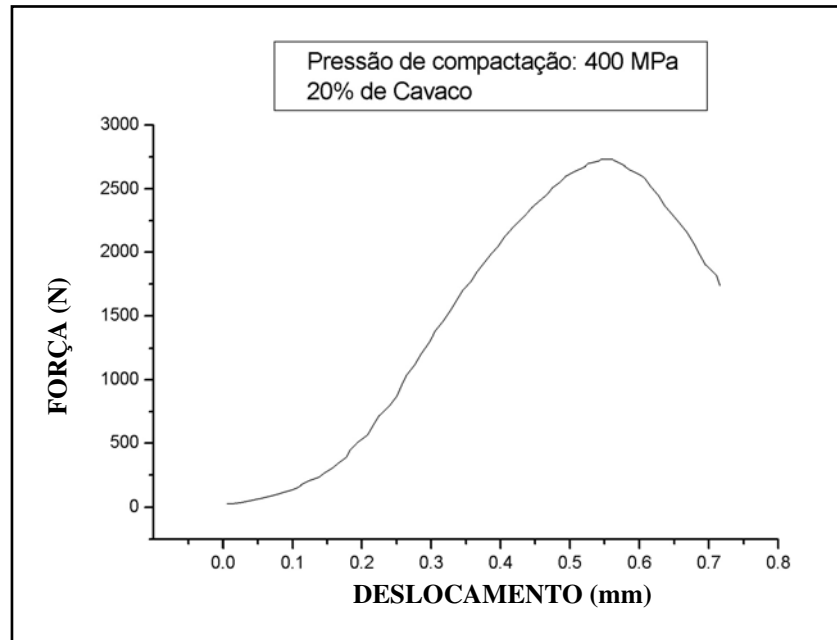


FIGURA 4.1- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2733N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.

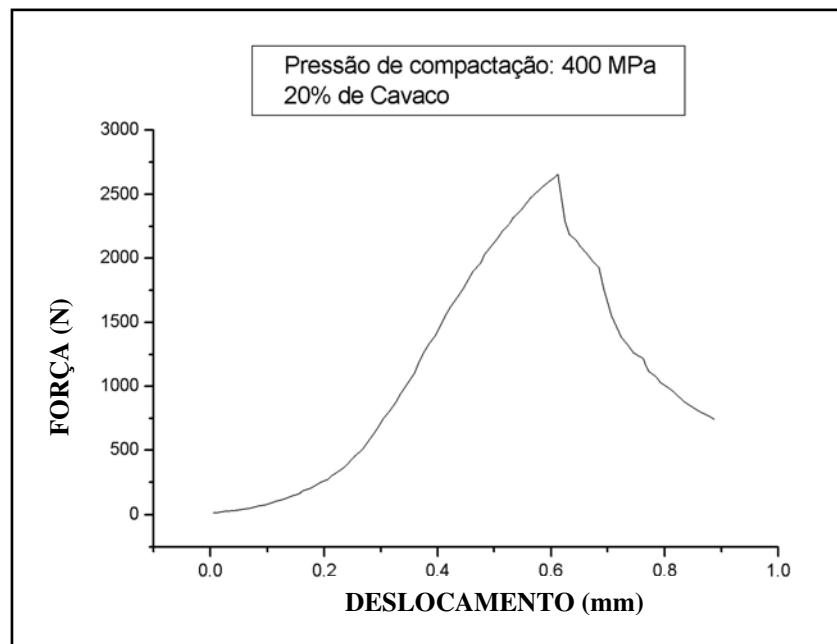


FIGURA 4.2- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2657N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.

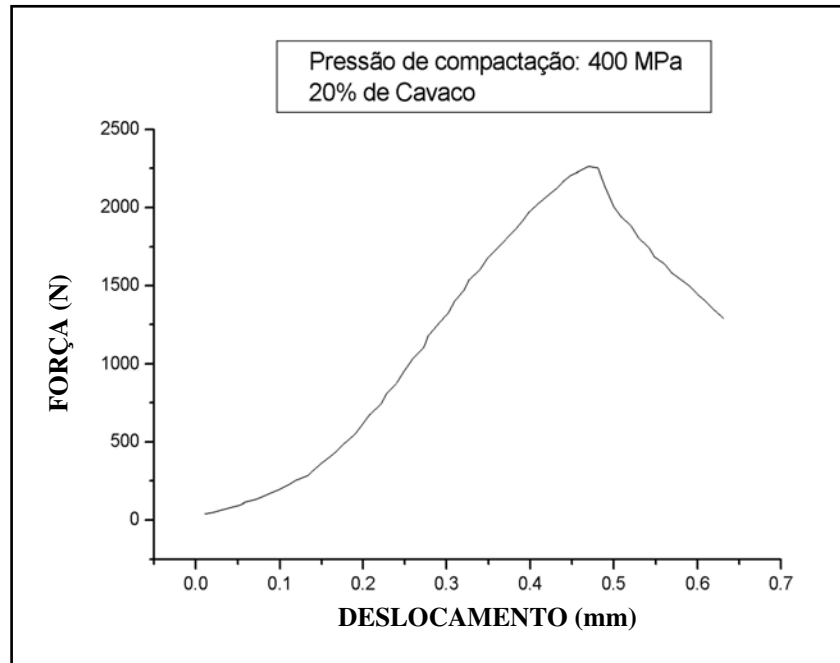


FIGURA 4.3- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2264N e o deslocamento máximo foi de 0,49mm.

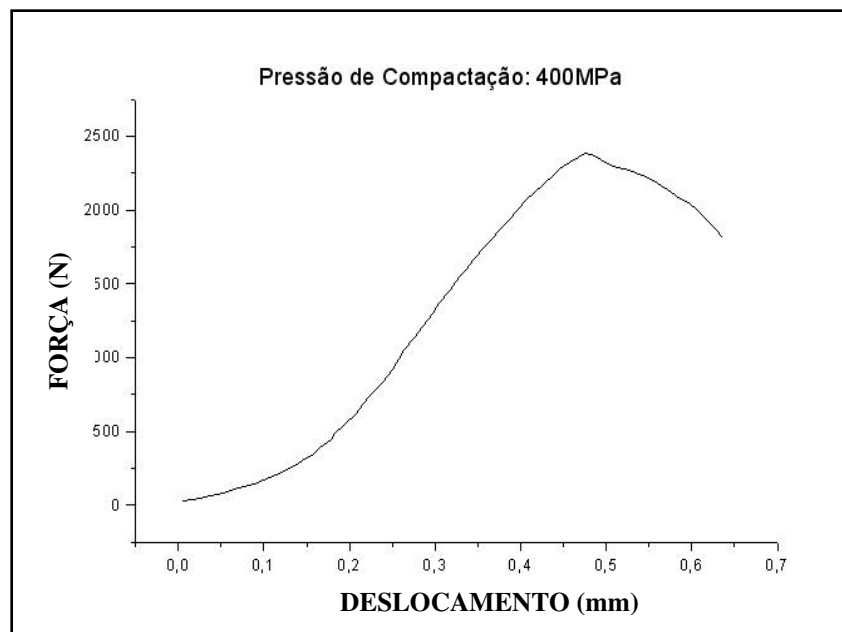


FIGURA 4.4- *Curva média* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G400. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 2551N ($\sigma=251$ N).

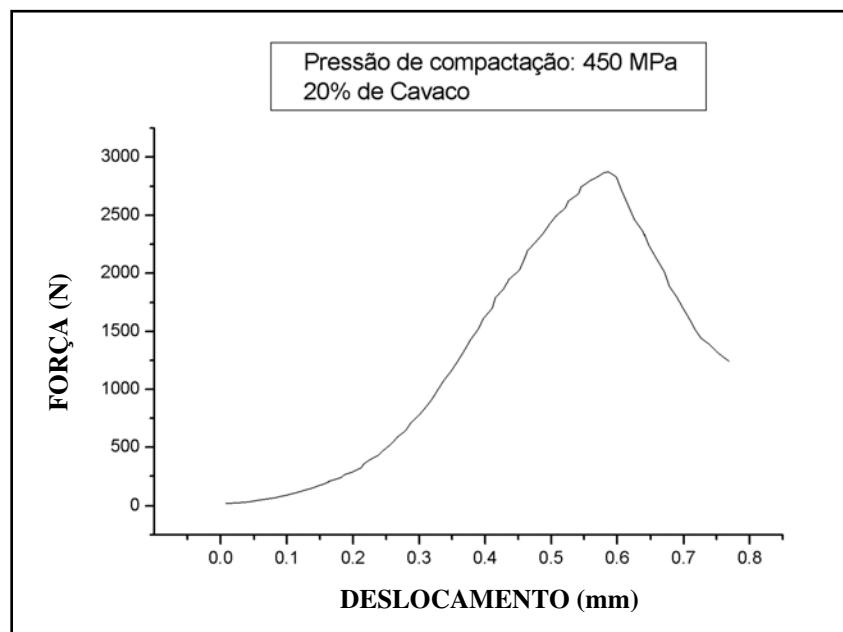


FIGURA 4.5- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2876N e o deslocamento máximo foi de 0,58mm.

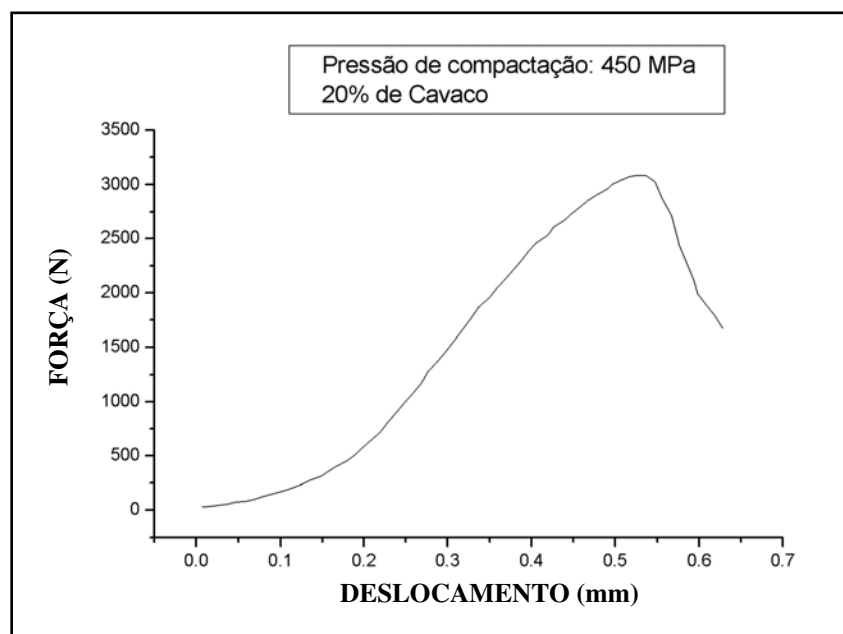


FIGURA 4.6- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3087N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.

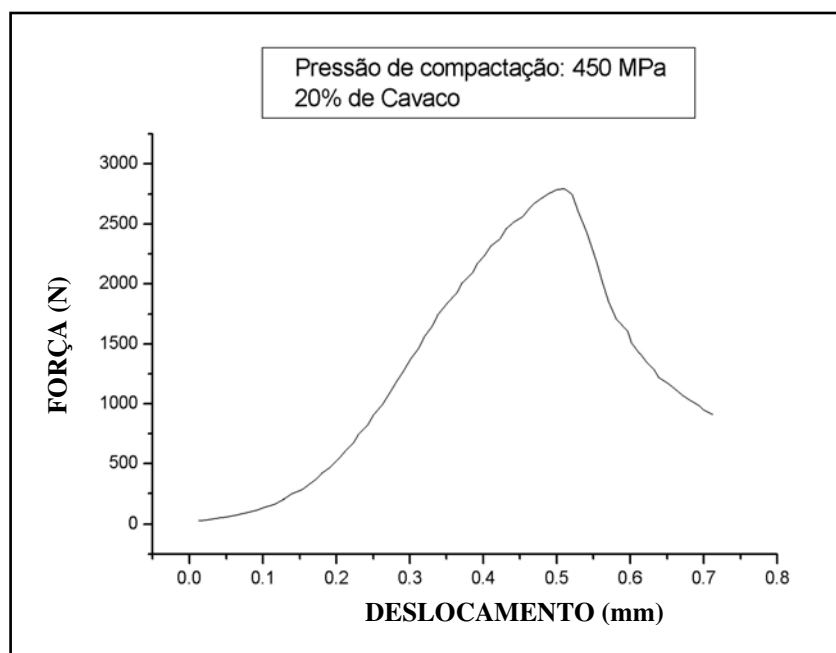


FIGURA 4.7- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2797N e o deslocamento máximo foi de 0,51mm.

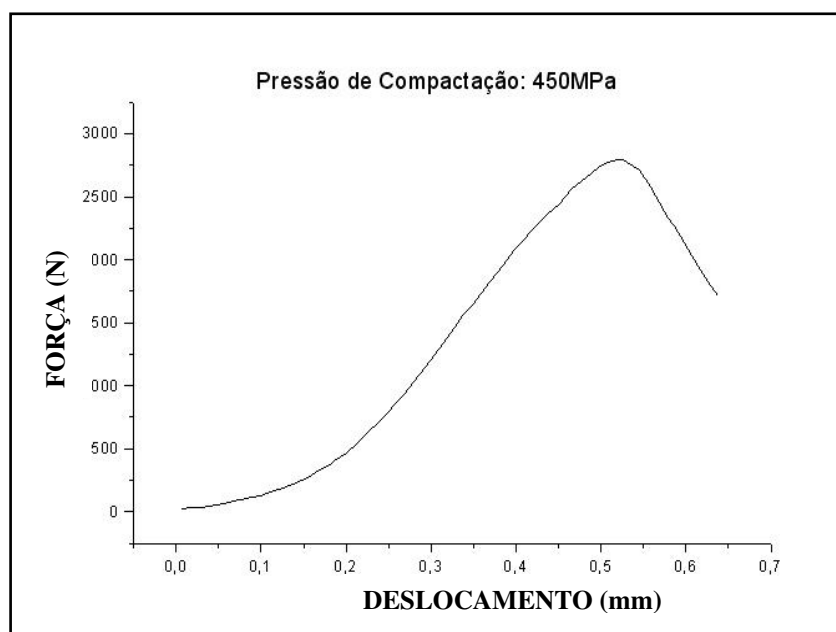


FIGURA 4.8- *Curva média* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos - G450. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 2920N ($\sigma=150$ N).

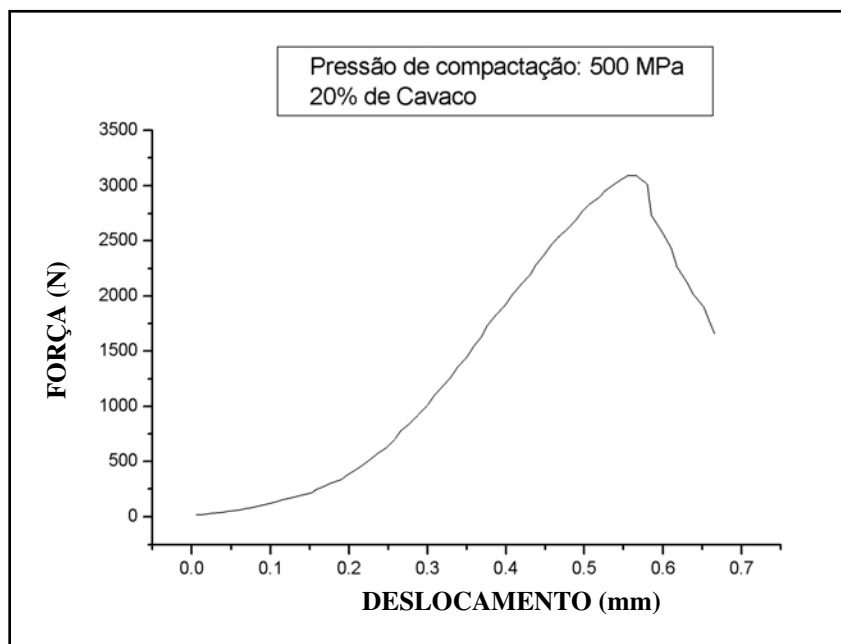


FIGURA 4.9- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3097N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.

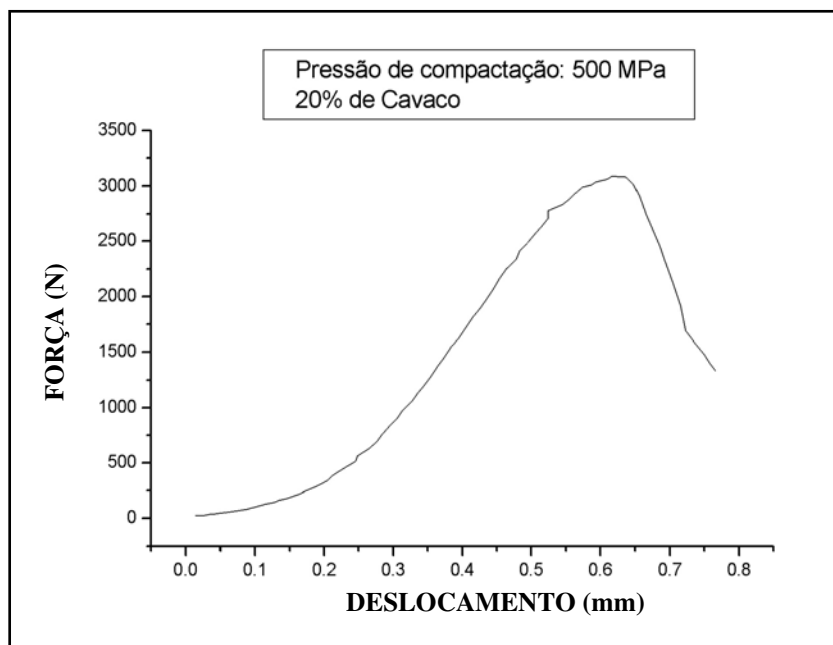


FIGURA 4.10- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3086N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.

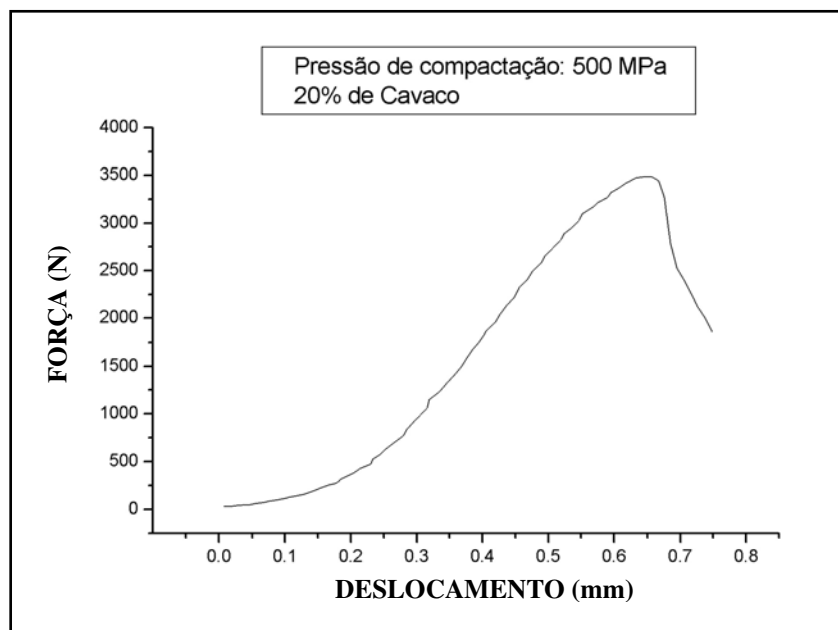


FIGURA 4.11- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3488N e o deslocamento máximo foi de 0,65mm.

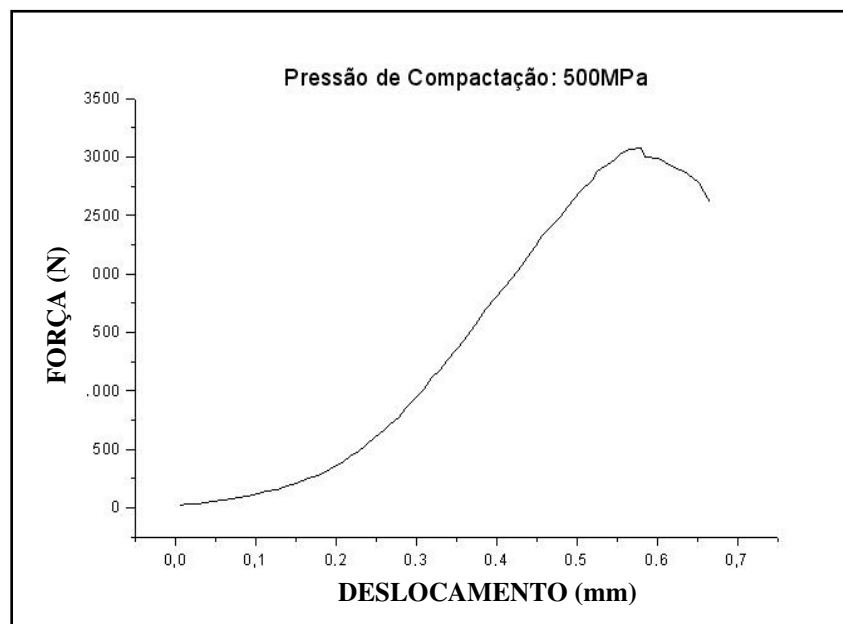


FIGURA 4.12- *Curva média* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G500. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3224N ($\sigma=228$ N).

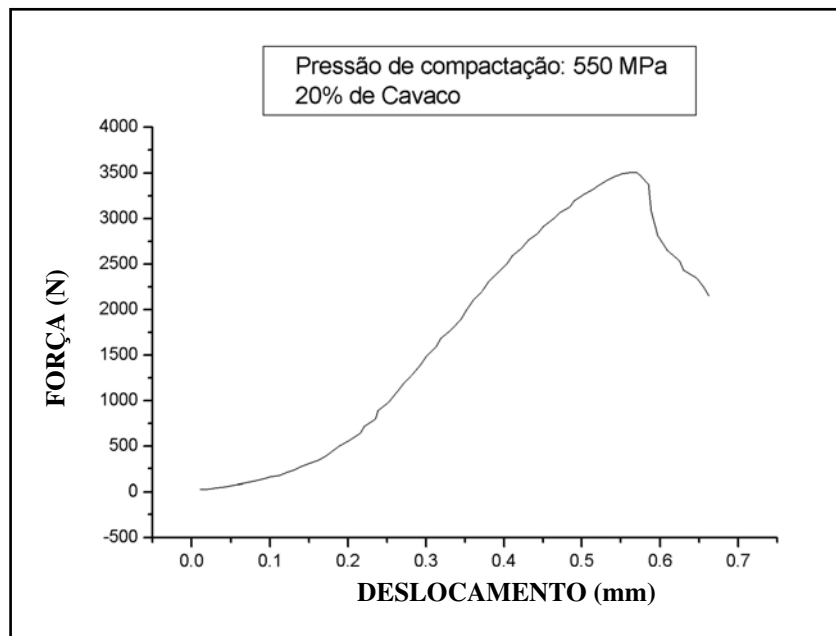


FIGURA 4.13- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3511N e o deslocamento máximo foi de 0,56mm.

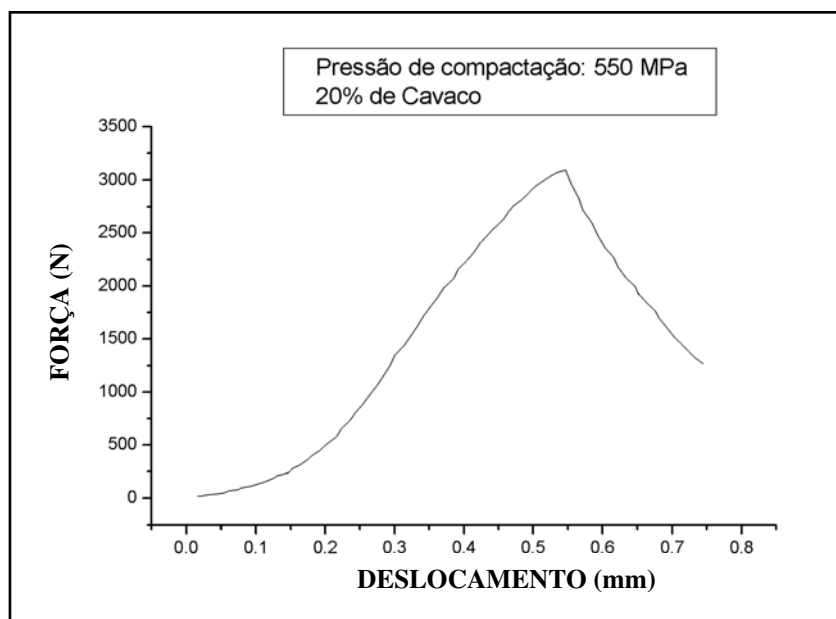


FIGURA 4.14- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3095N e o deslocamento máximo foi de 0,55mm.

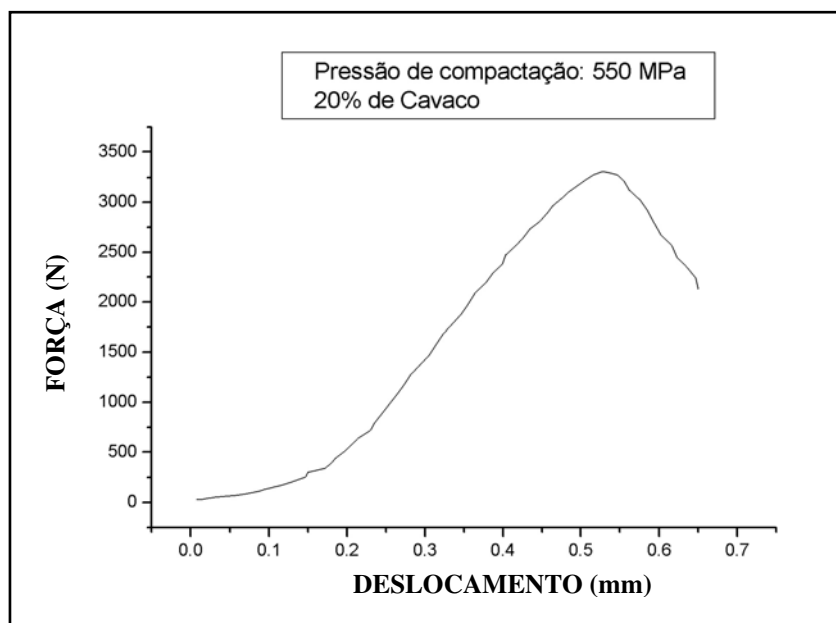


FIGURA 4.15- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3307N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.

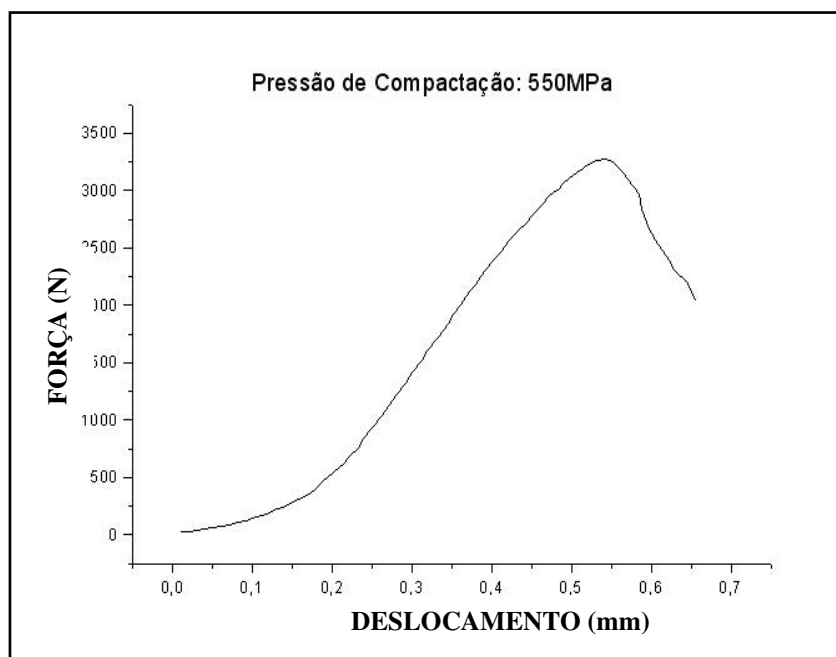


FIGURA 4.16- *Curva média* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G550. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3304N ($\sigma=208$ N).

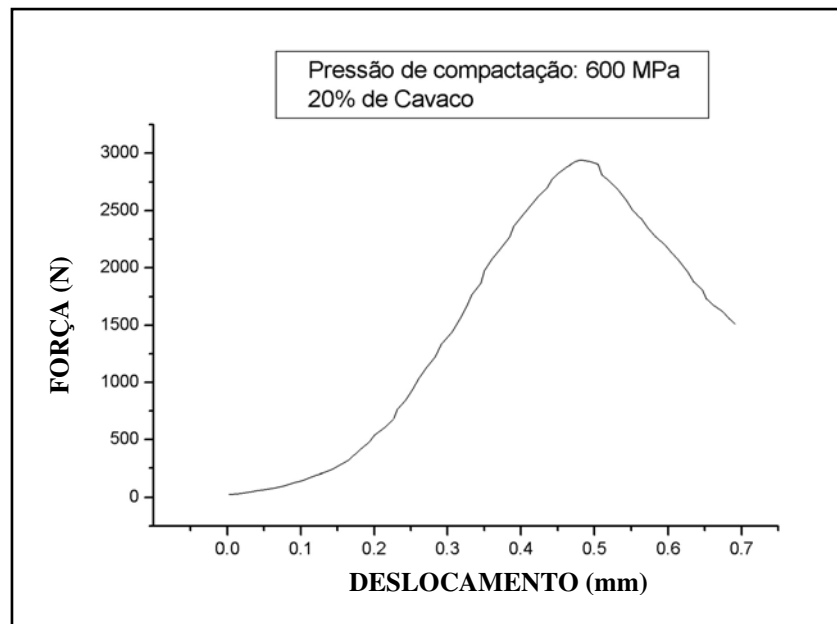


FIGURA 4.17- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3378N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.

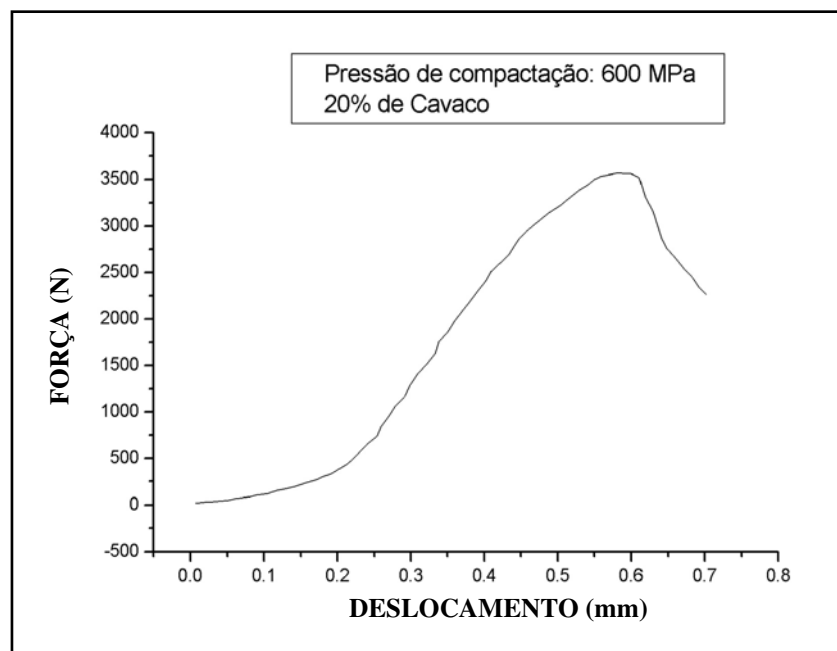


FIGURA 4.18- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3576N e o deslocamento máximo foi de 0,58mm.

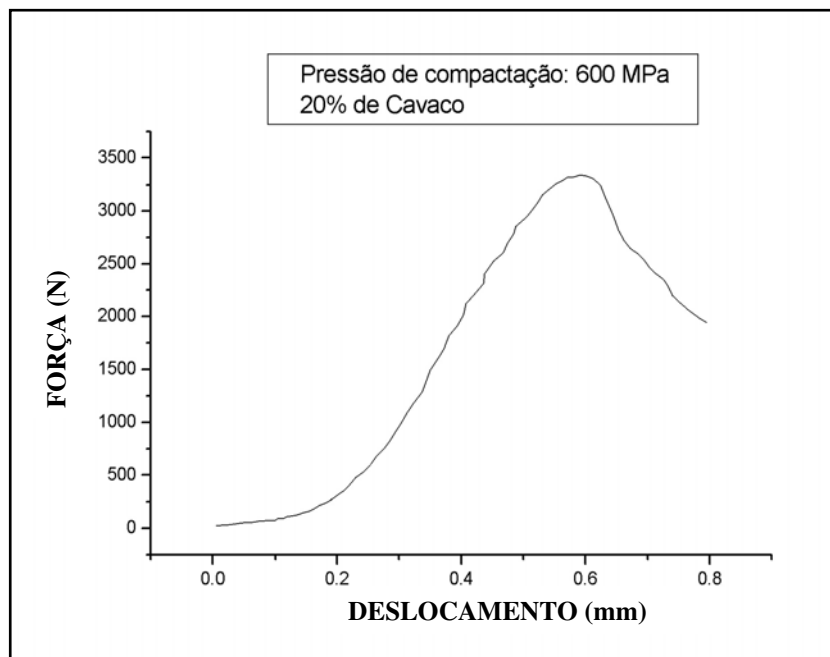


FIGURA 4.19- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600(3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3343N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.

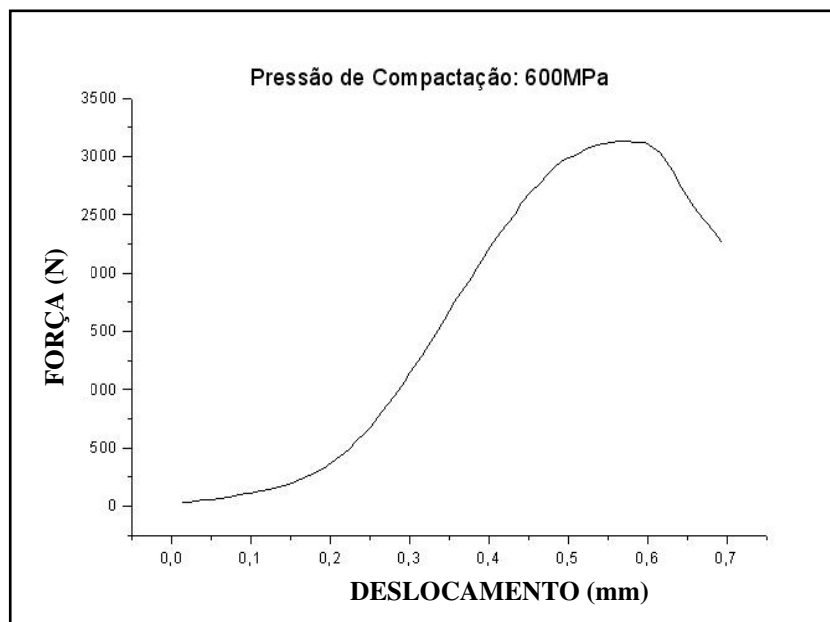


FIGURA 4.20- *Curva média* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos – G600. Neste caso, o valor médio da carga máxima foi de 3432N ($\sigma=125\text{N}$).

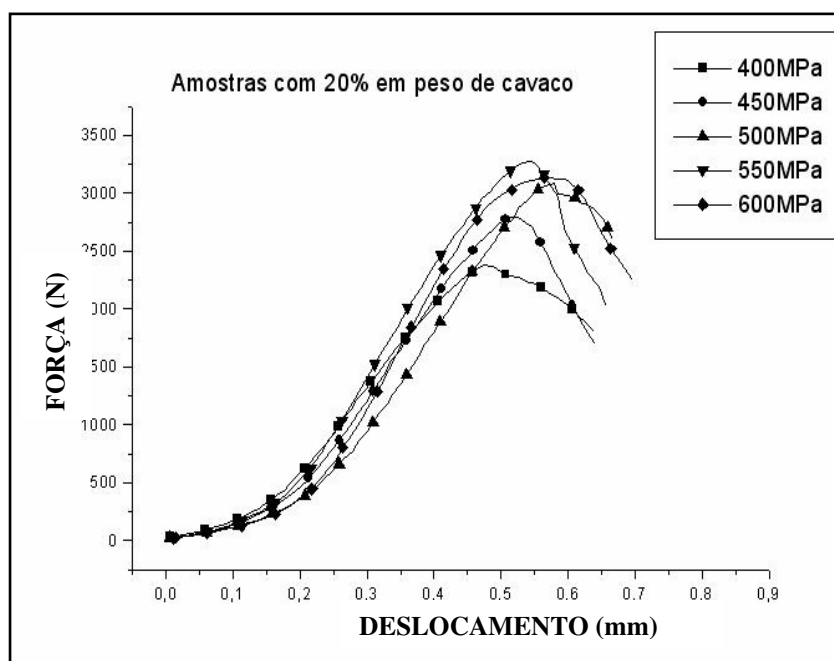


FIGURA 4.21- *Curvas médias* da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos para as várias condições de compactação. Neste caso, a pressão de compactação adotada foi de 600MPa. Observa-se que pressões de compactação da ordem de 550MPa poderiam ter sido adotadas, também.

4.1.2- Discussão e Conclusão dos Ensaio Preliminares

Os gráficos apresentados nas figuras 4.4, 4.8 e 4.12 correspondentes às pressões de compactação de 400, 450 e 500 MPa, respectivamente, revelaram que para essas misturas de 20% de cavaco em 80% de pó de aço inoxidável 316L, a média de resistência à ruptura transversal situa-se entre 2551 e 3224N. Já, nos gráficos apresentados nas figuras 4.16 e 4.20 correspondentes às pressões de compactação de 550 e 600MPa, respectivamente, este valor sobe para uma média próxima a 3450N.

O gráfico da figura 4.21 ilustra muito bem a tendência de aumento da resistência mecânica para os casos correspondentes aos corpos-de-prova compactados com 400, 450 e 500 MPa. Já, nos casos em que a pressão de compactação foi de 550 e 600MPa, houve uma pequena inversão desses valores. Provavelmente, esta inversão se deu pelo fato de que esses tipos de misturas (pó e cavaco) são muito heterogêneas e que a diferença de tamanho entre pó e cavaco é

da ordem de dezenas de vezes e além disso, as ligações metalúrgicas devido à sinterização foram em muitos casos interrompidas, conforme será visto e discutido ao final do presente trabalho.

Portanto, a pressão de compactação dos corpos-de-prova para os ensaios definitivos, variando-se a porcentagem de cavaco, foi fixada em 600MPa.

4.2- RESULTADOS DOS ENSAIOS DEFINITIVOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

No presente item são apresentados os gráficos gerados dos ensaios definitivos de flexão em três pontos dos corpos-de-prova com 0,0; 5,0; 10,0;.....;25% de cavaco. Para cada condição foram ensaiados cinco corpos-de-prova, assim identificados: 0%CP1; 0%CP2;.....;0%CP5 - 5%CP1; 5%CP2;.....5%CP5 -25%CP1; 25%CP2;.....25%CP5.

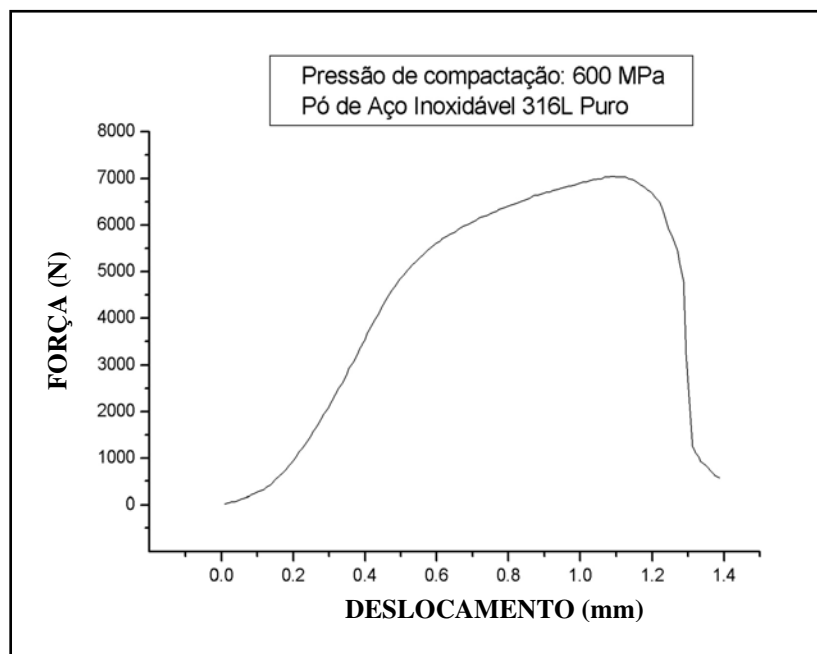


FIGURA 4.22- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7044N e o deslocamento máximo foi de 1,11mm.

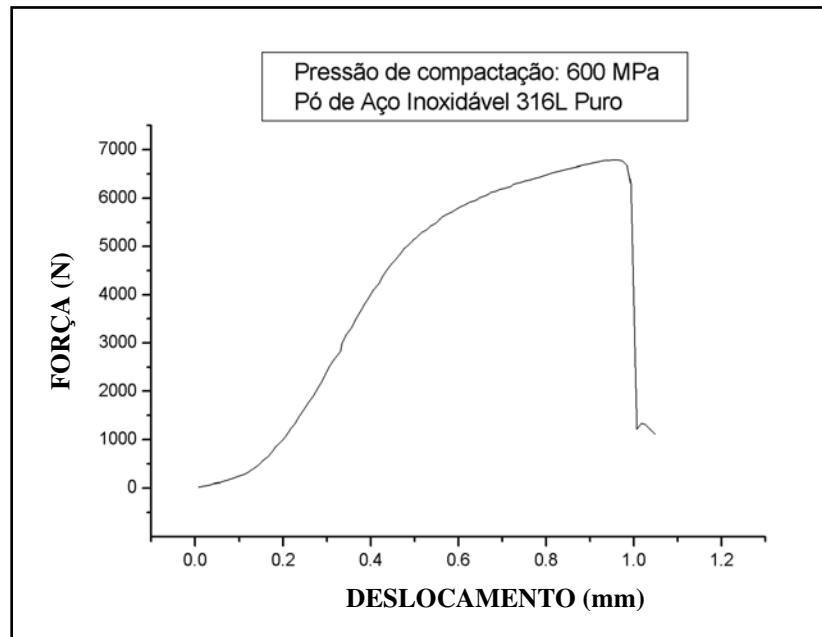


FIGURA 4.23- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 6786N e o deslocamento máximo foi de 0,96mm.

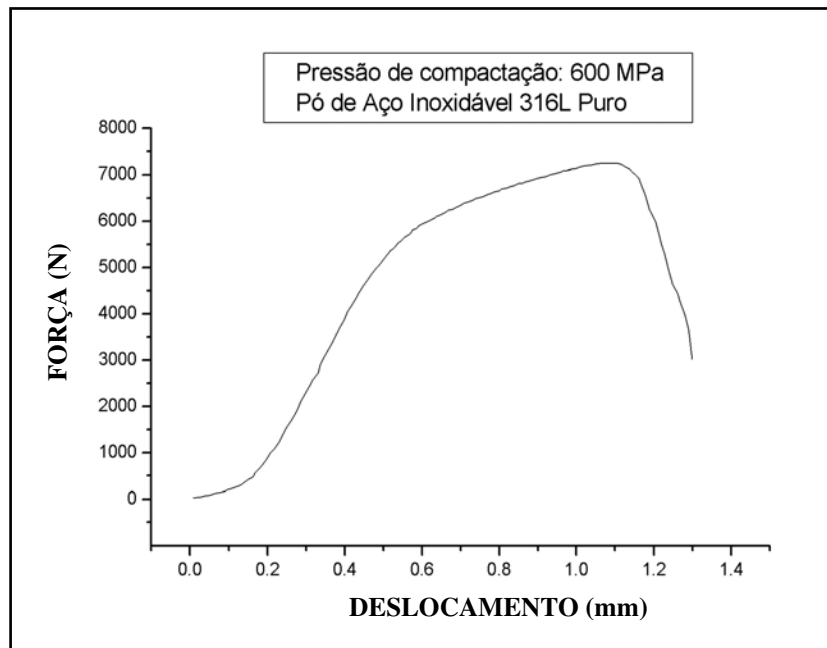


FIGURA 4.24- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7247N e o deslocamento máximo foi de 1,09mm.

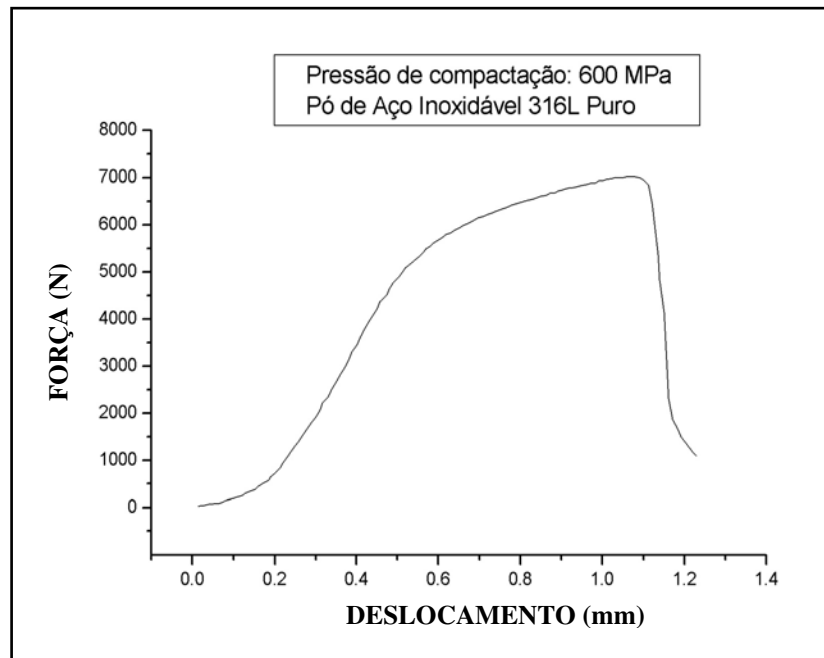


FIGURA 4.25- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 7035N e o deslocamento máximo foi de 1,07mm.

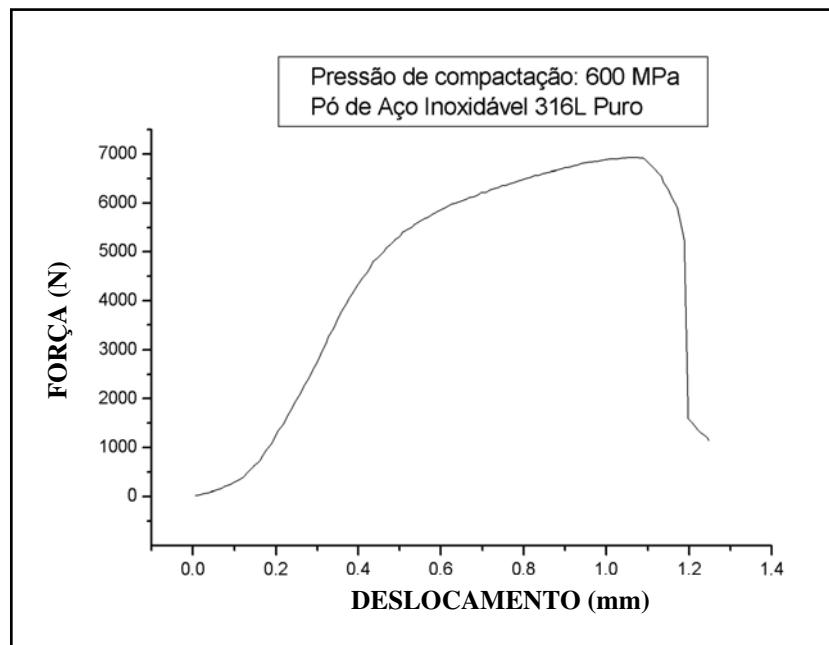


FIGURA 4.26- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (0%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 6928N e o deslocamento máximo foi de 1,07mm.

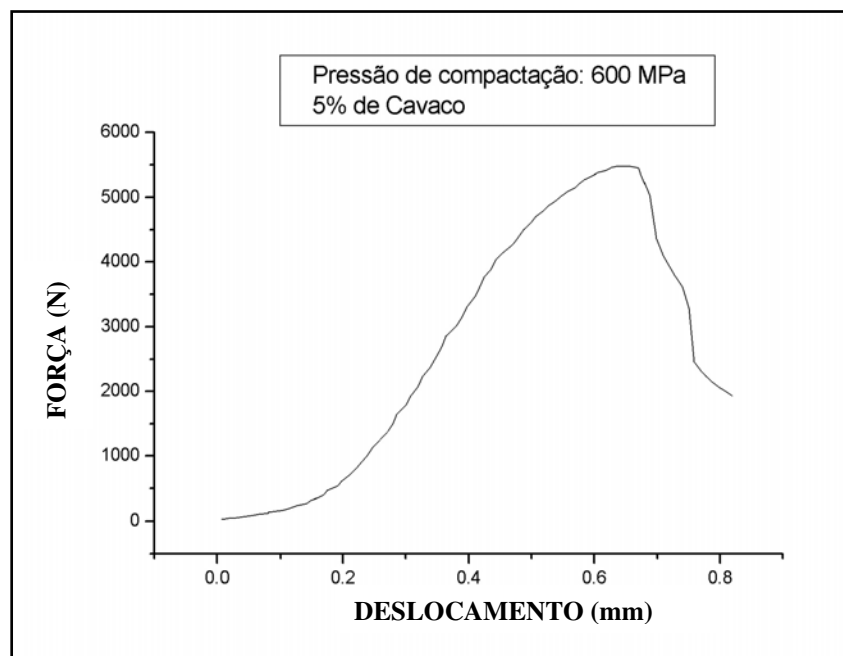


FIGURA 4.27- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5480N e o deslocamento máximo foi de 0,63mm.

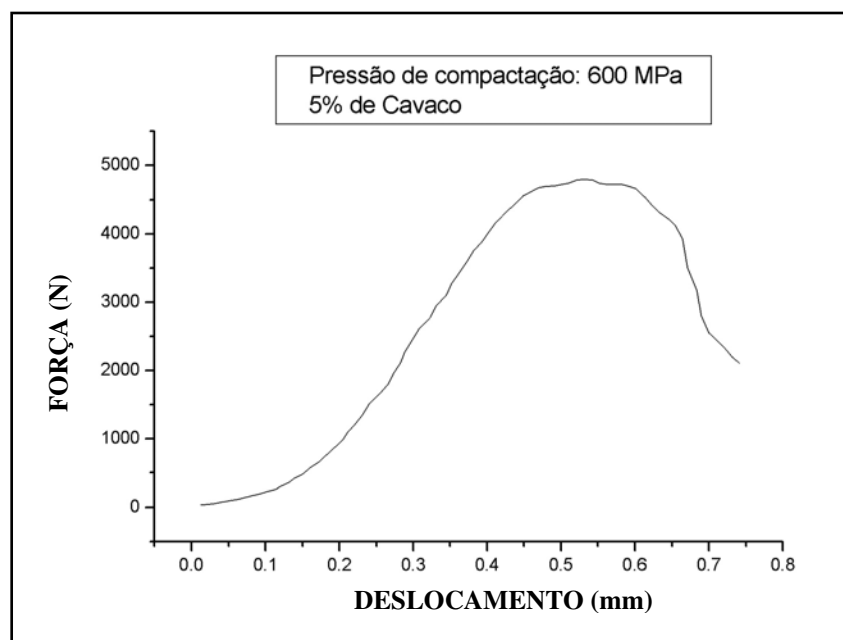


FIGURA 4.28- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4804N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.

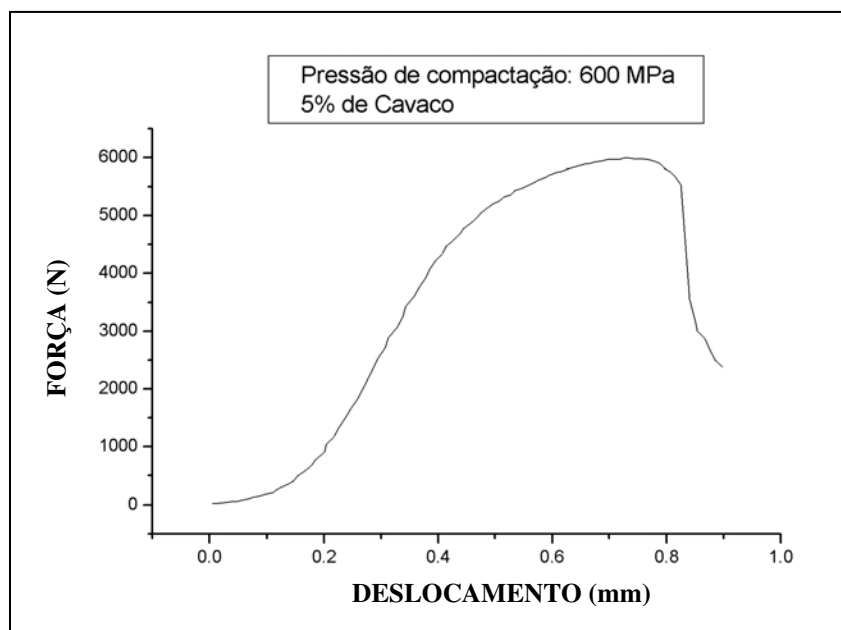


FIGURA 4.29- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5982N e o deslocamento máximo foi de 0,75mm.

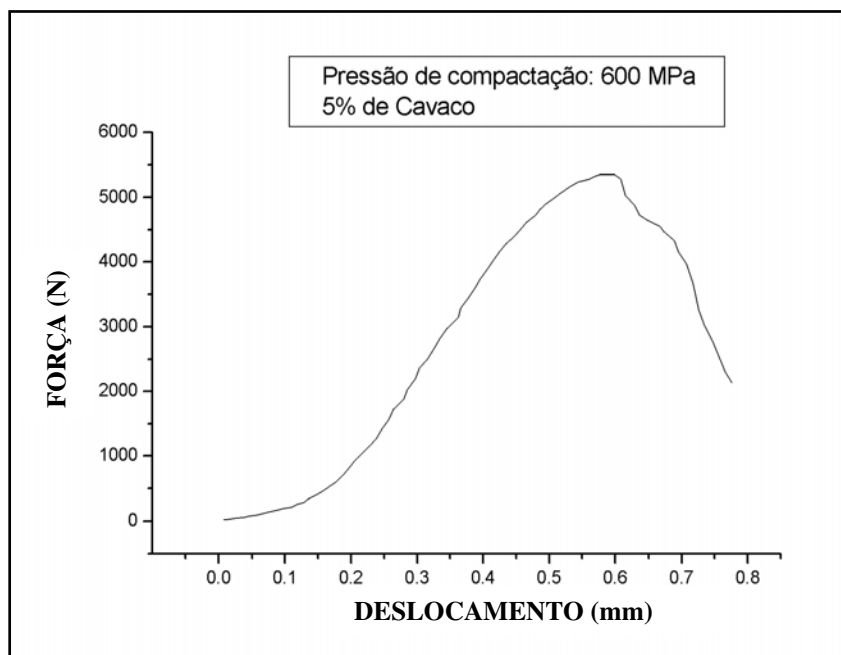


FIGURA 4.30- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5356N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.

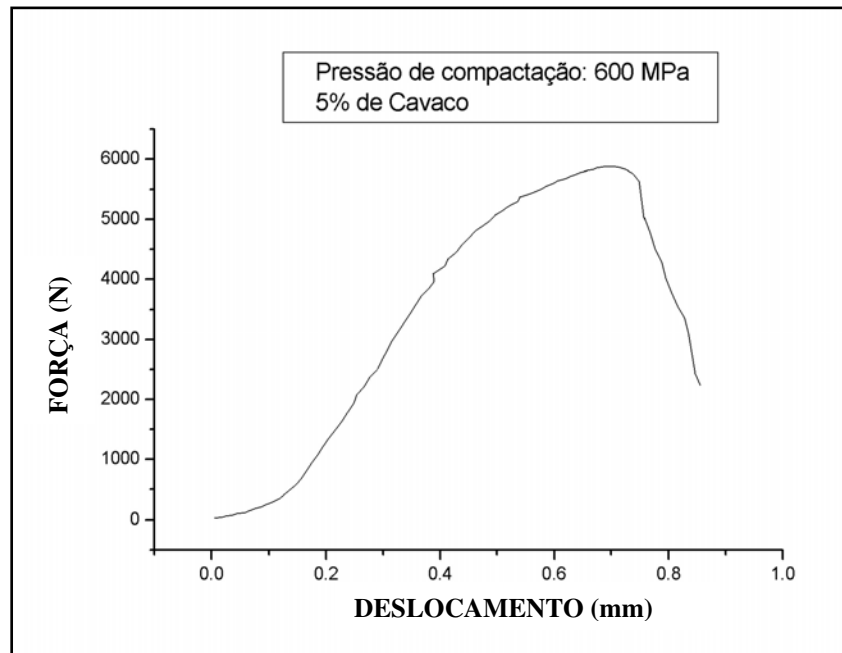


FIGURA 4.31- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (5%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5876N e o deslocamento máximo foi de 0,70mm.

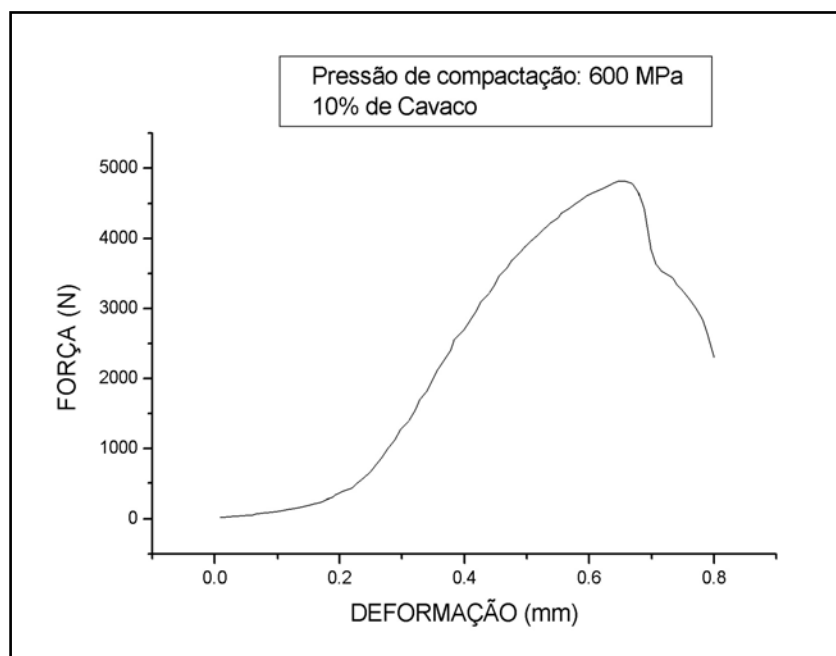


FIGURA 4.32- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4452N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.

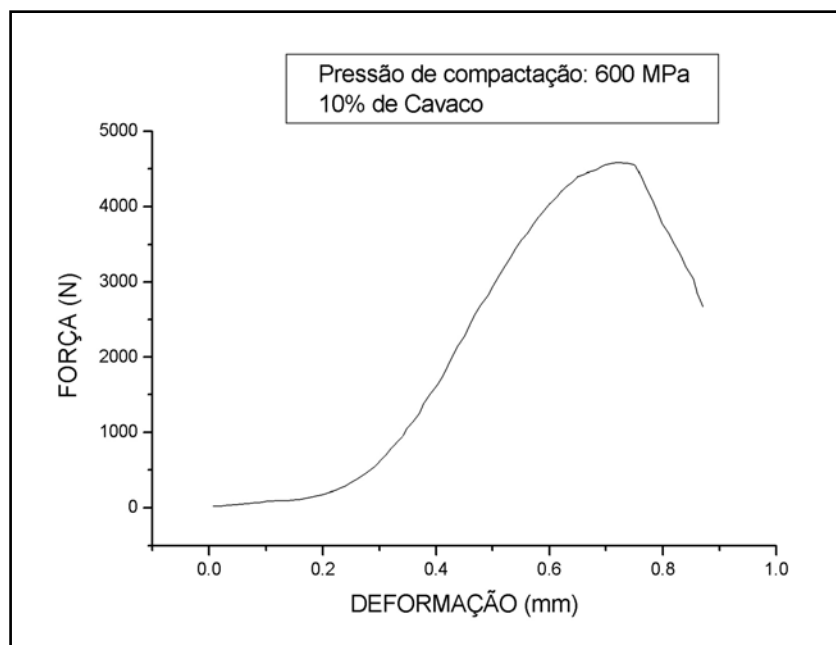


FIGURA 4.33- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 5019N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.

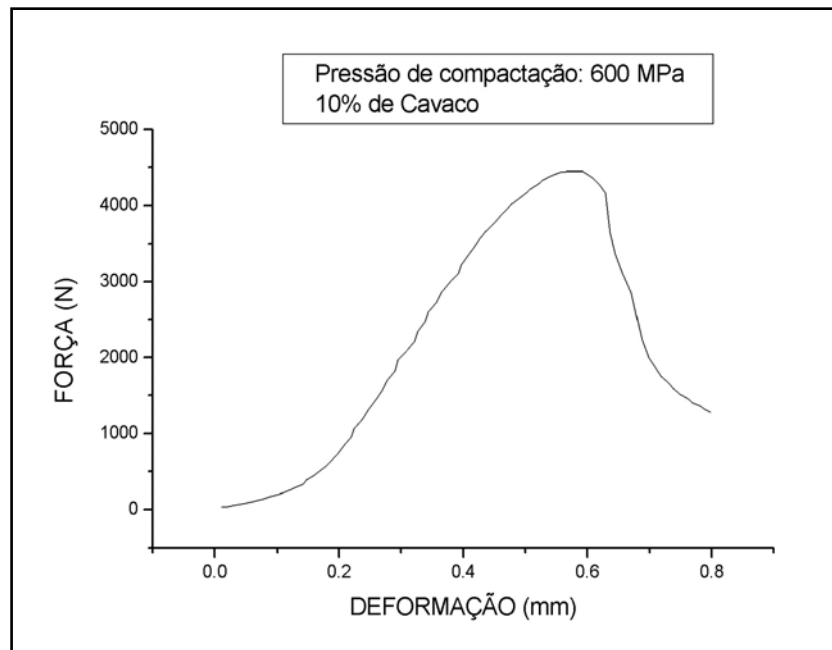


FIGURA 4.34- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4822N e o deslocamento máximo foi de 0,65mm.

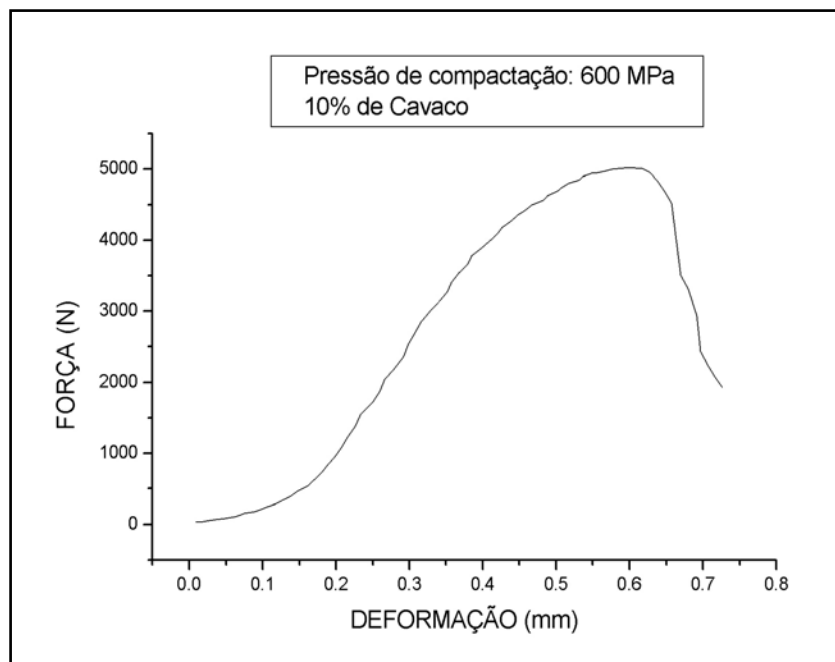


FIGURA 4.35- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4587N e o deslocamento máximo foi de 0,76mm.

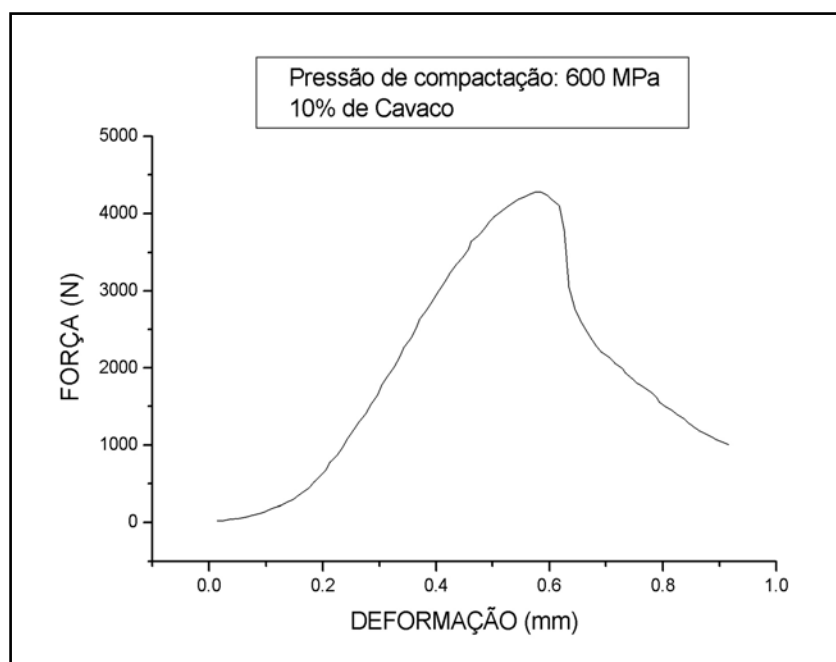


FIGURA 4.36- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (10%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4280N e o deslocamento máximo foi de 0,57mm.

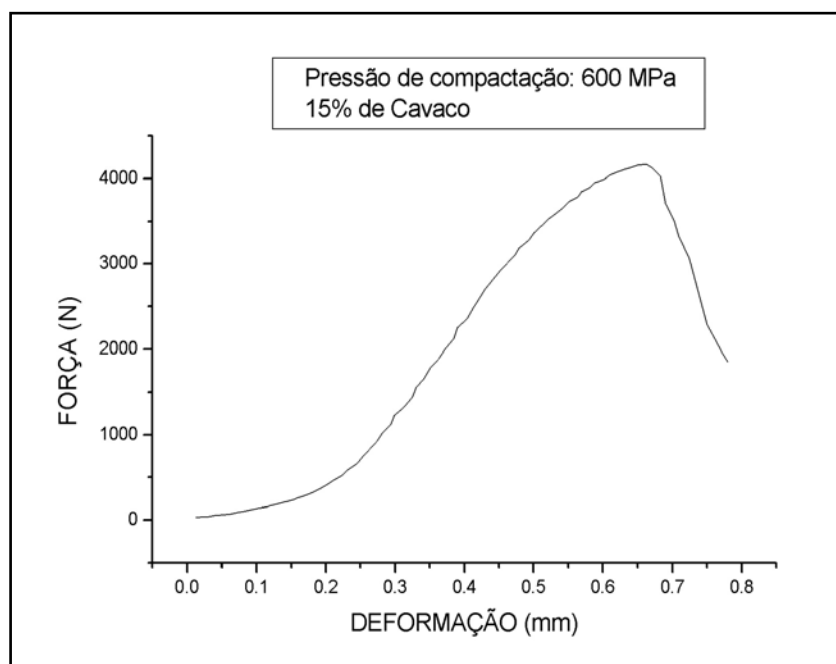


FIGURA 4.37- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4157N e o deslocamento máximo foi de 0,65mm.

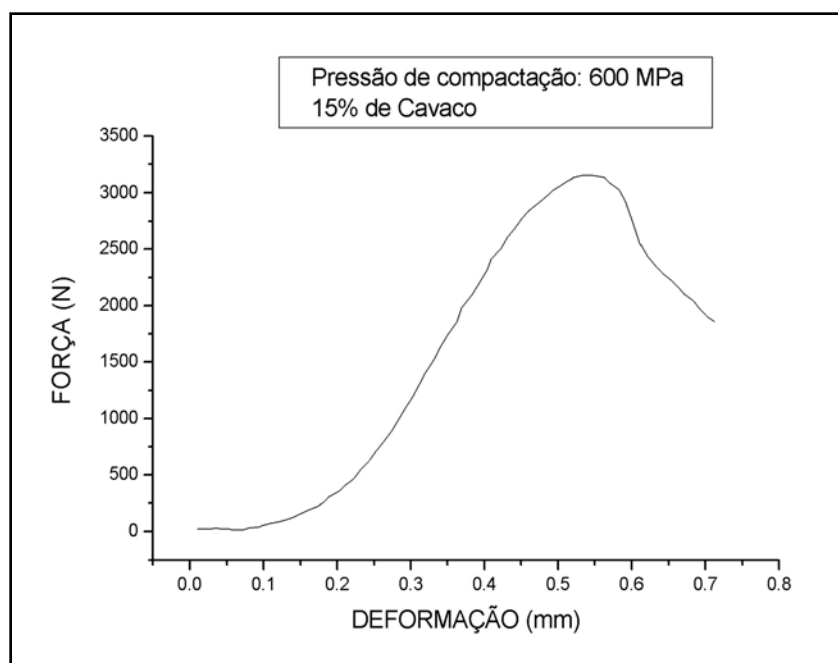


FIGURA 4.38- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3156N e o deslocamento máximo foi de 0,54mm.

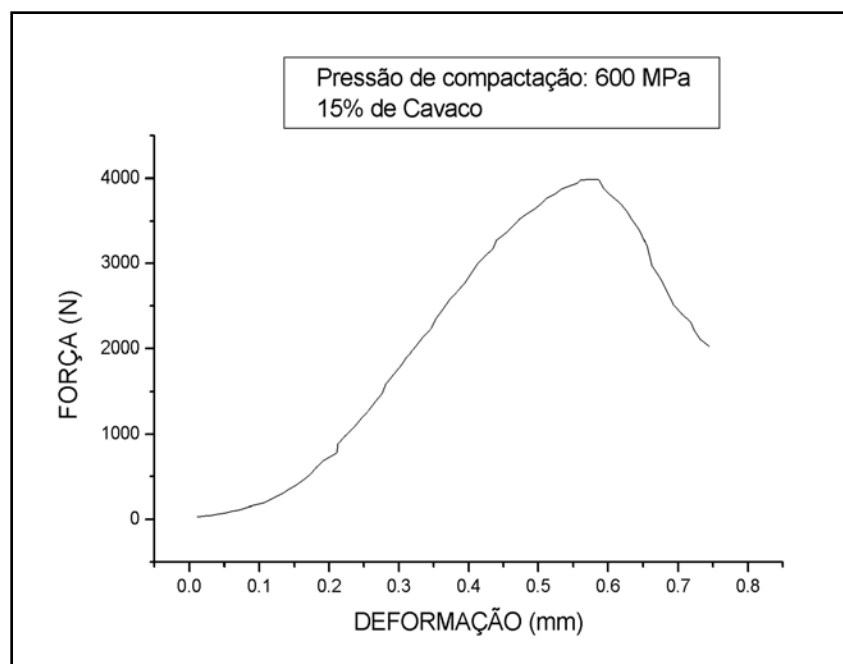


FIGURA 4.39- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3988N e o deslocamento máximo foi de 0,57mm.

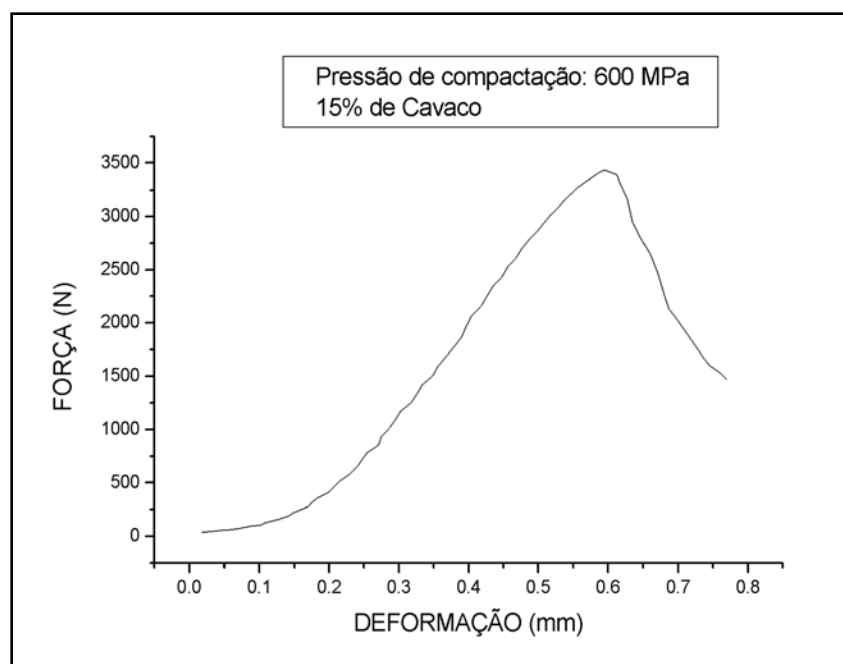


FIGURA 4.40- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3437N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.

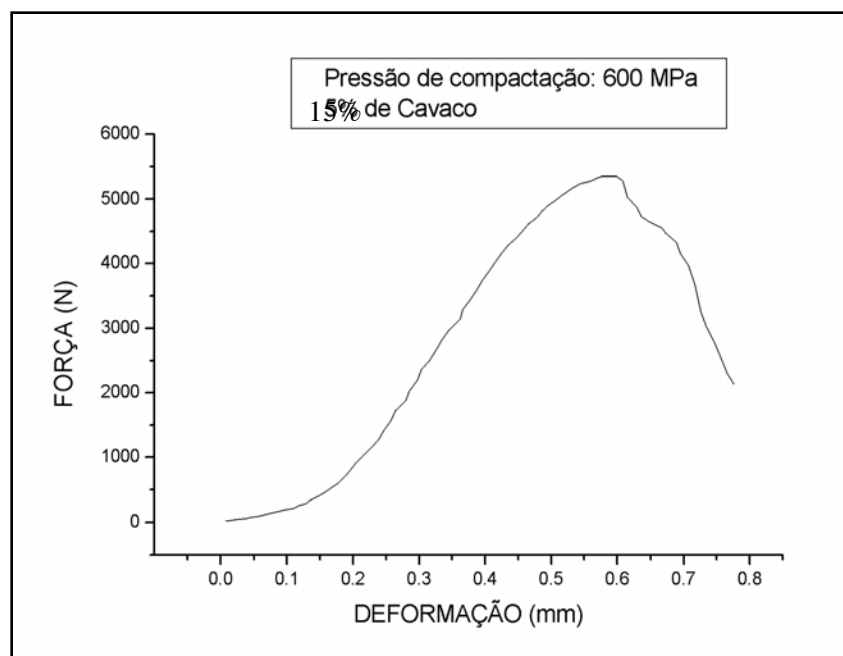


FIGURA 4.41- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (15%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3789N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.

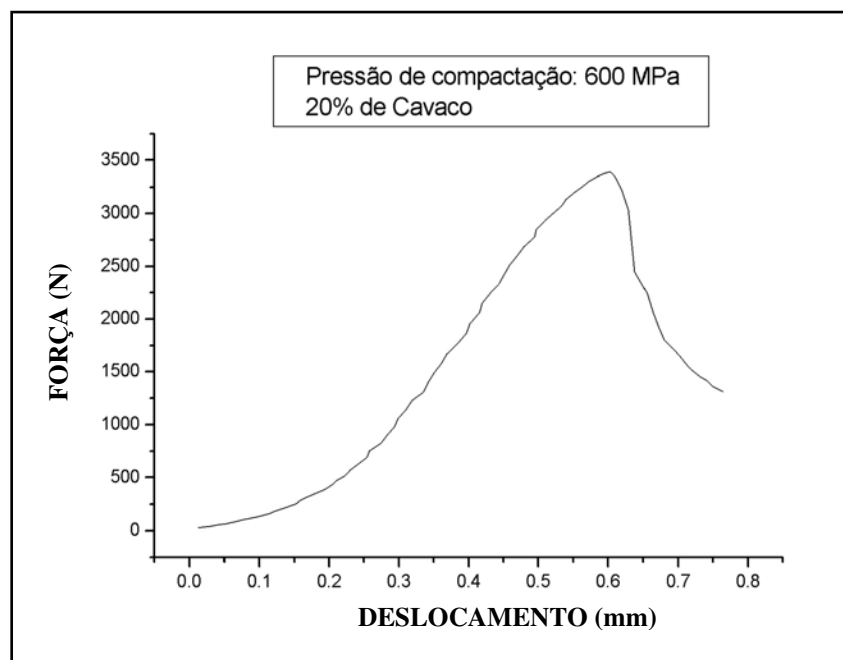


FIGURA 4.42- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3393N e o deslocamento máximo foi de 0,60mm.

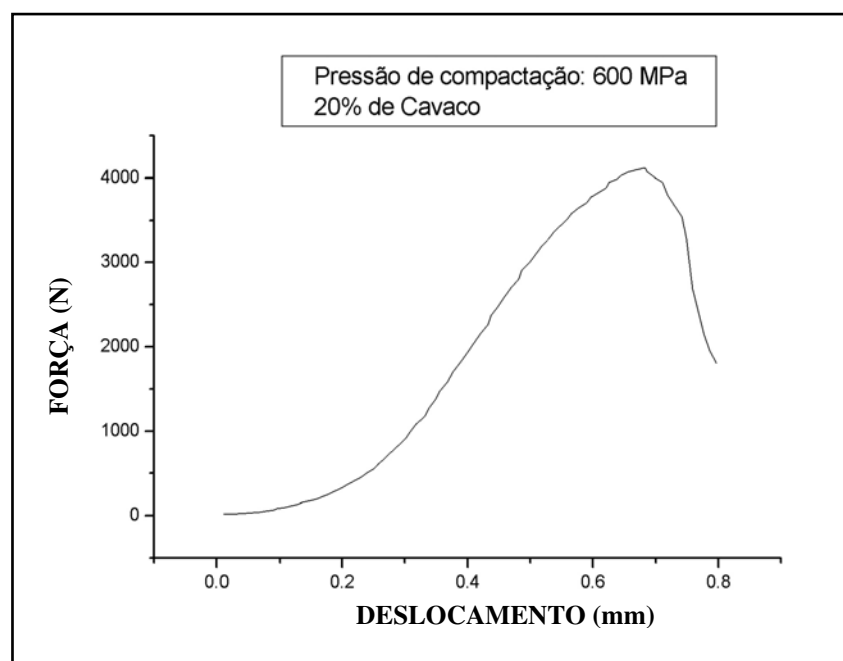


FIGURA 4.43- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 4122N e o deslocamento máximo foi de 0,68mm.

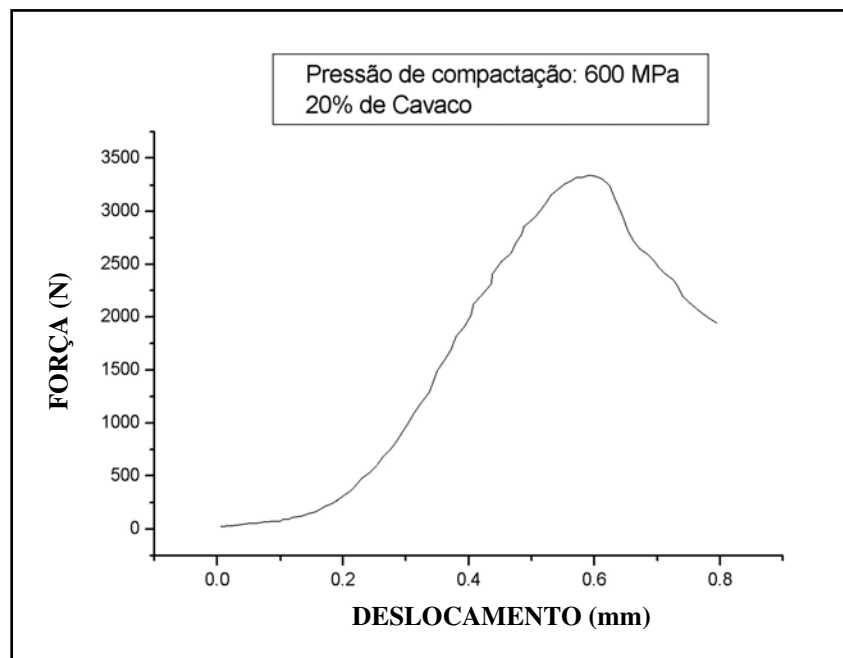


FIGURA 4.44- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3839N e o deslocamento máximo foi de 0,70mm.

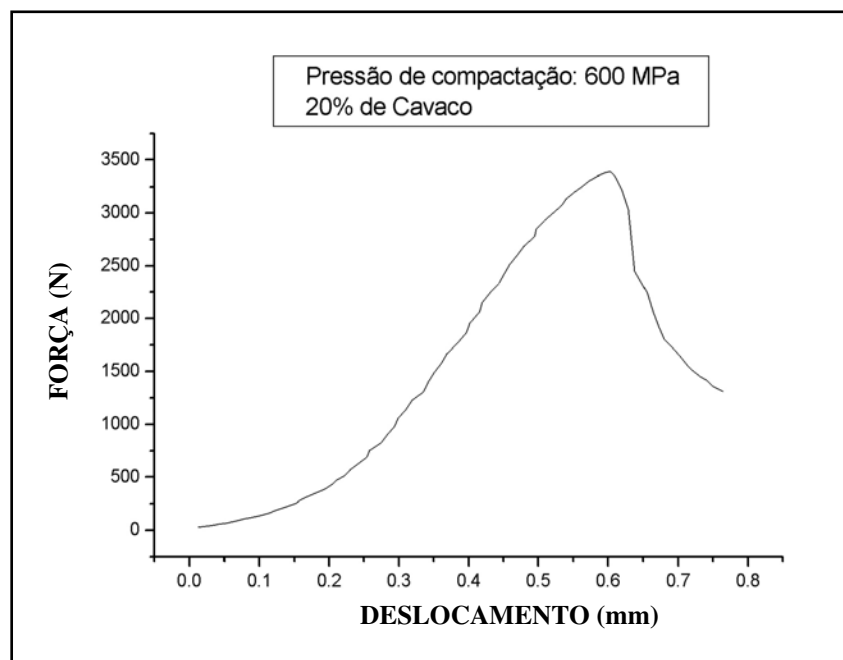


FIGURA 4.45- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3428N e o deslocamento máximo foi de 0,62mm.

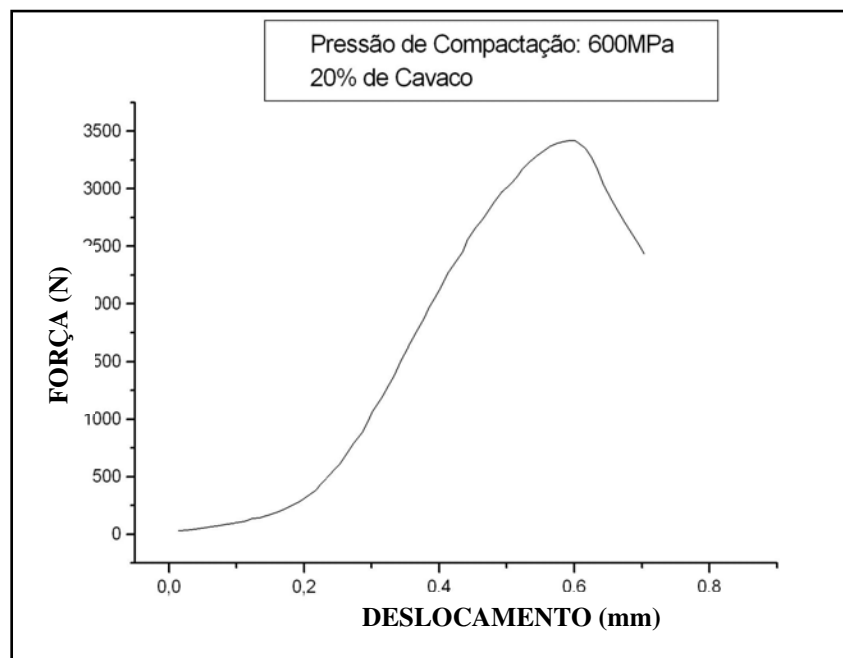


FIGURA 4.46- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (20%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 3428N e o deslocamento máximo foi de 0,58mm.

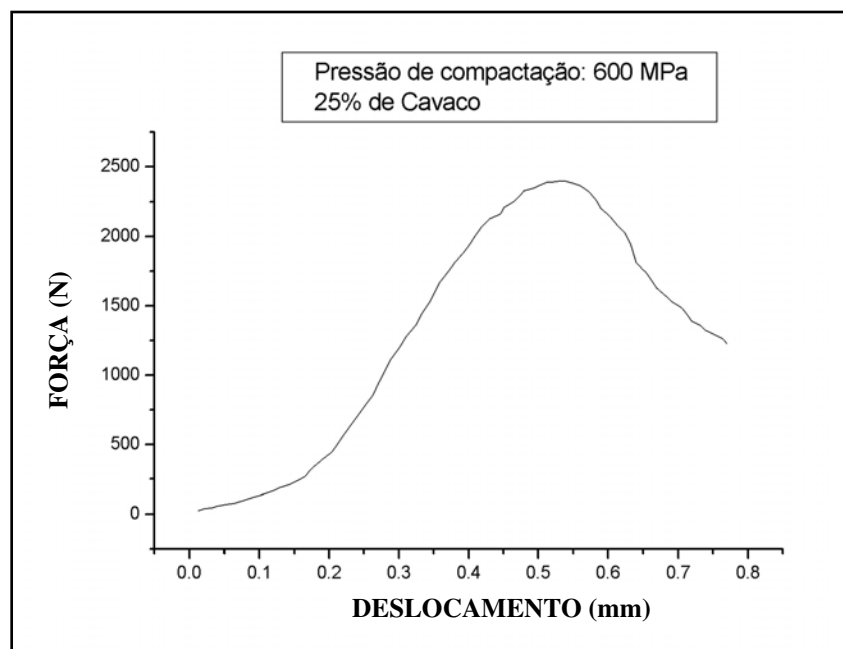


FIGURA 4.47- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP1). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2412N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.

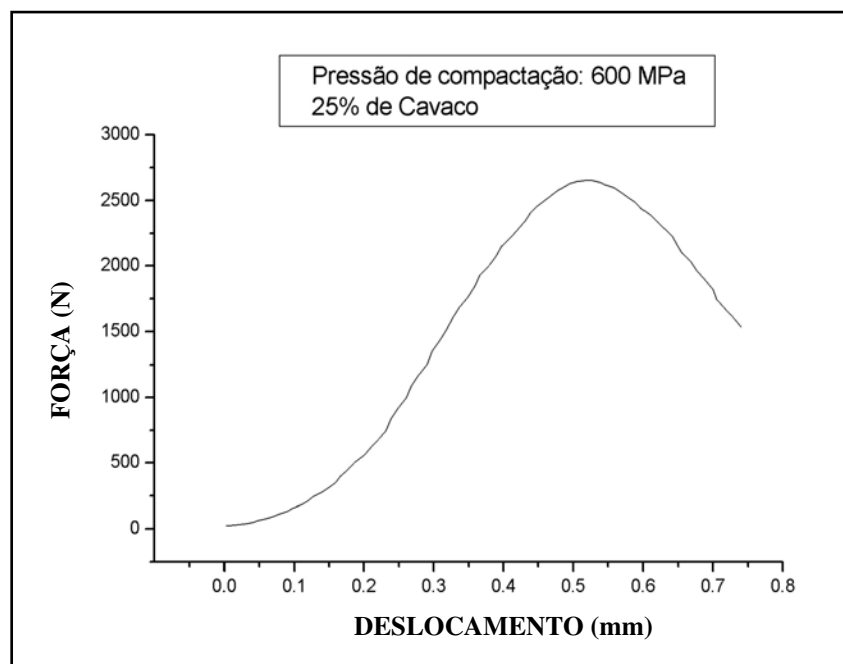


FIGURA 4.48- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP2). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2400N e o deslocamento máximo foi de 0,53mm.

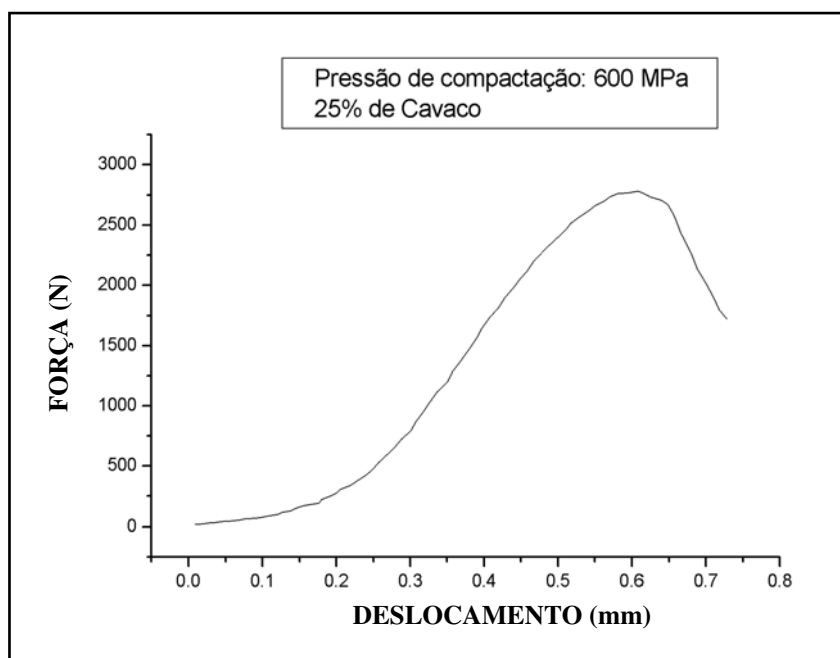


FIGURA 4.49- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP3). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2656N e o deslocamento máximo foi de 0,52mm.

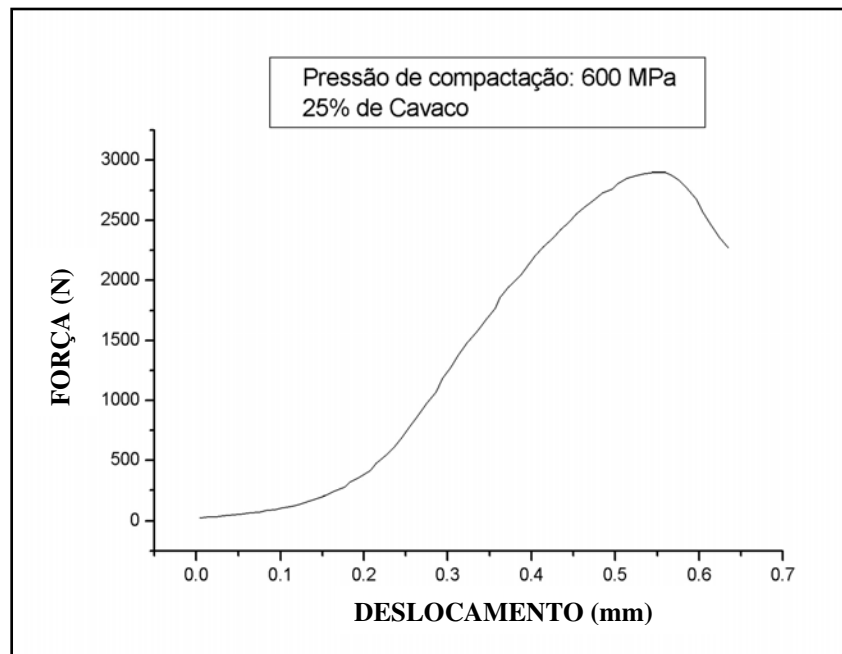


FIGURA 4.50- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP4). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 2782N e o deslocamento máximo foi de 0,61mm.

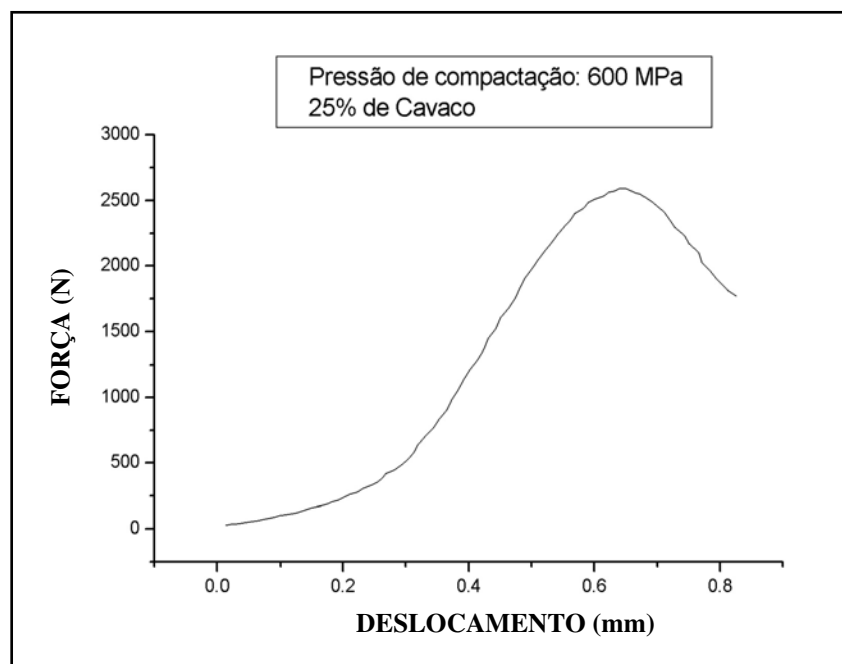


FIGURA 4.51- Curva da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos (25%CP5). Neste caso, o valor da carga máxima foi de 33412N e o deslocamento máximo foi de 0,59mm.

4.2.1- Curvas médias da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos, de cada condição de ensaio

No presente item são apresentados os gráficos médios gerados dos ensaios definitivos de ruptura transversal em três pontos dos corpos-de-prova com 0,0% ;5,0%; 10,0%;.....;25% de cavaco. Para cada condição foram ensaiados cinco corpos-de-prova.

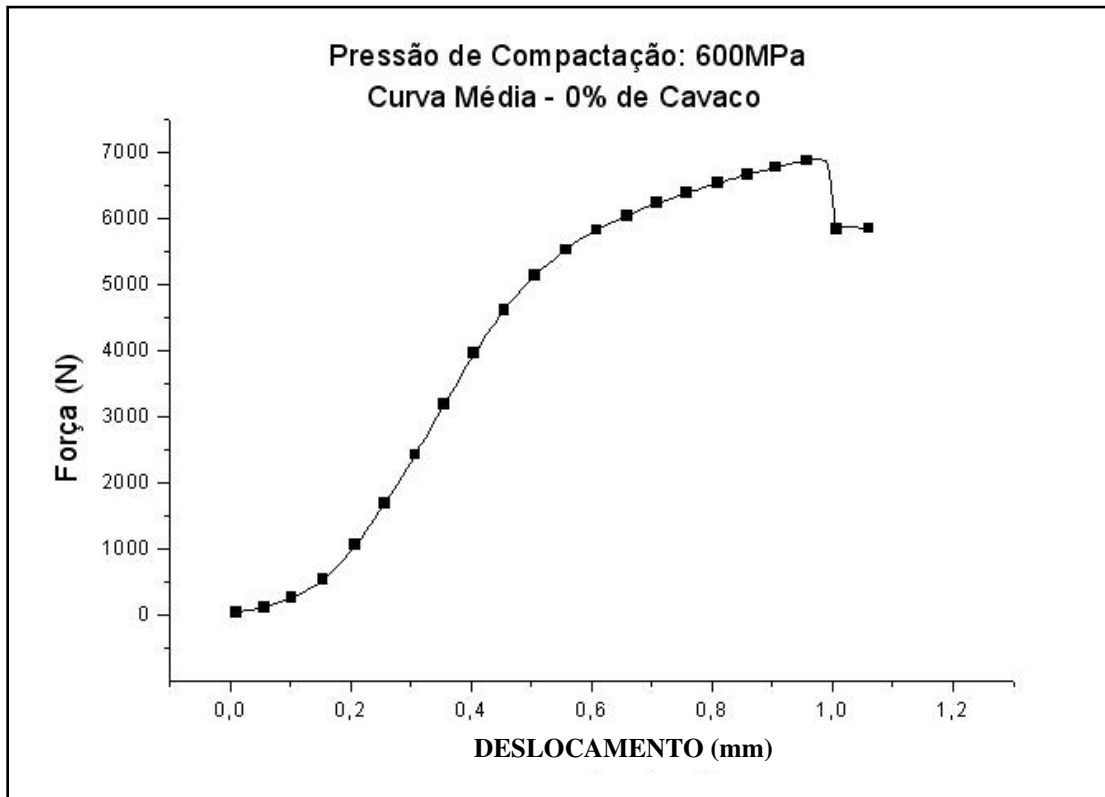


FIGURA 4.52- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova que não continham cavaco (0% de cavaco). Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 7008N ($\sigma = 169\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 1,06mm ($\sigma_\epsilon = 5,8 \times 10^{-2}\text{mm}$).

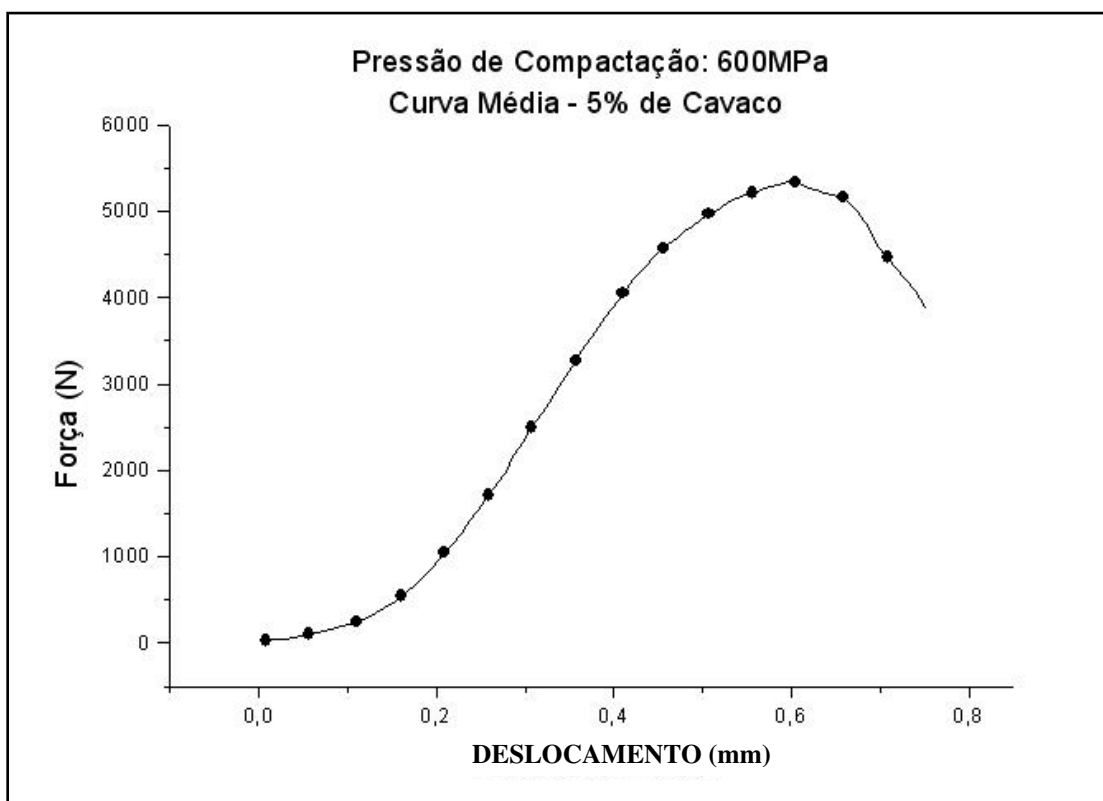


FIGURA 4.53- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 5% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 5500N ($\sigma = 468\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 0,64mm ($\sigma_\epsilon = 5,6 \times 10^{-2}\text{mm}$).

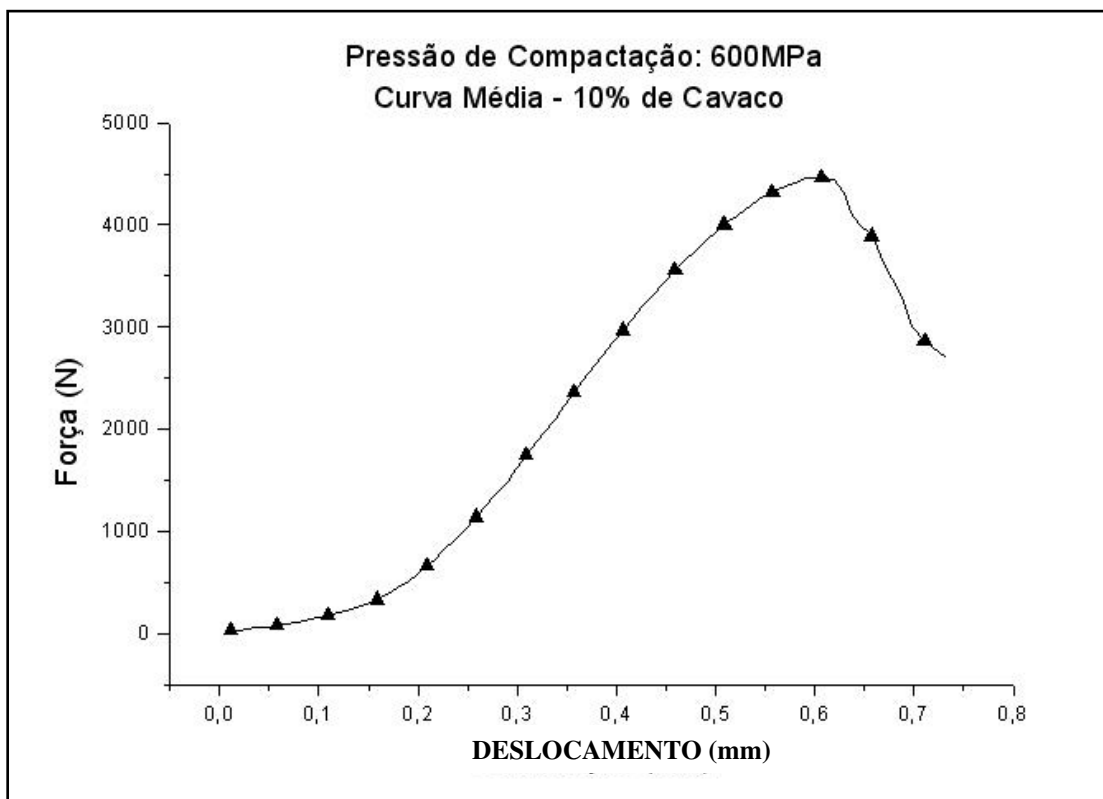


FIGURA 4.54- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 10% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 4632N ($\sigma = 293\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 0,63mm ($\sigma_\epsilon = 7,6 \times 10^{-2}\text{mm}$).

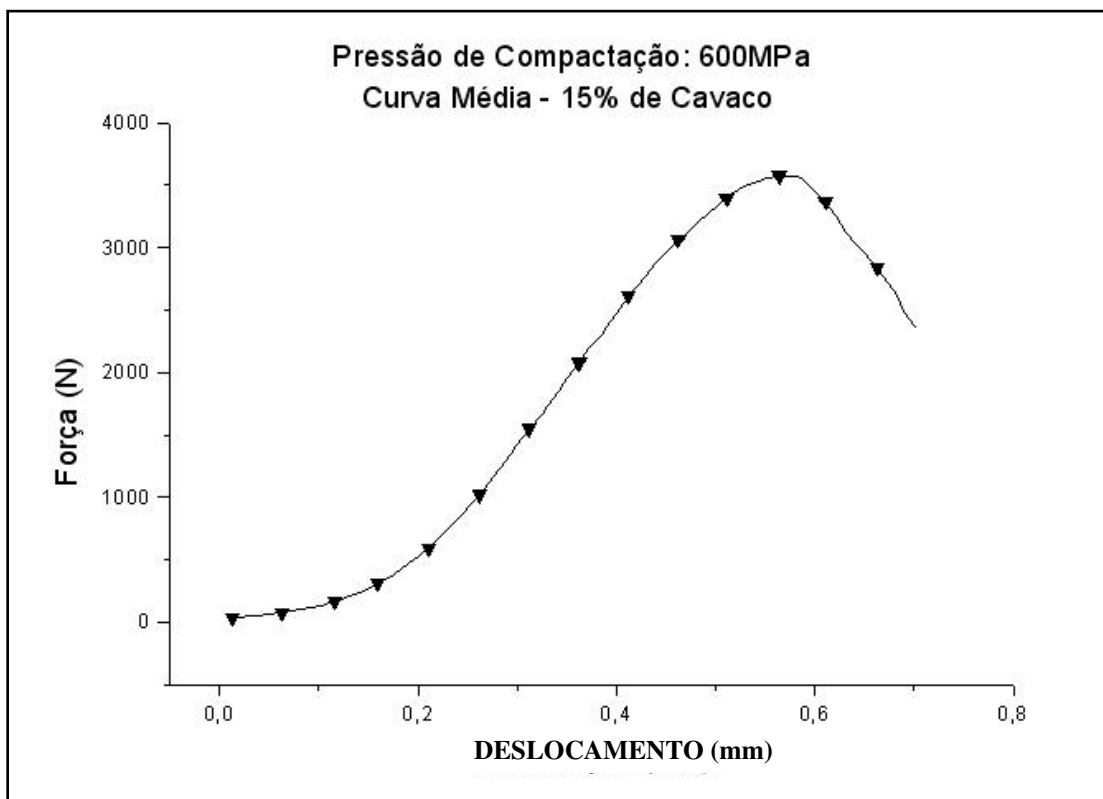


FIGURA 4.55- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 15% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 3705N ($\sigma = 407\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 0,56mm ($\sigma_\epsilon = 4,8 \times 10^{-2}\text{mm}$).

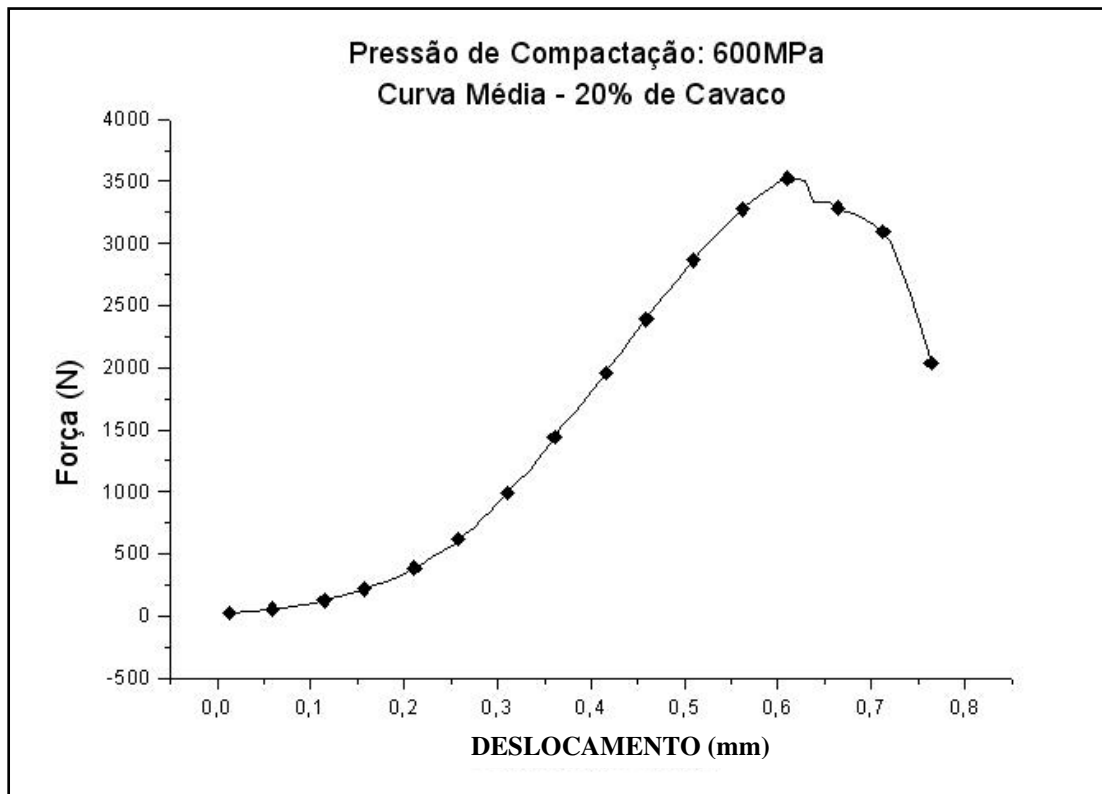


FIGURA 4.56- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 20% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 3640N ($\sigma = 328\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 0,64mm ($\sigma_\epsilon = 5,2 \times 10^{-2}\text{mm}$).

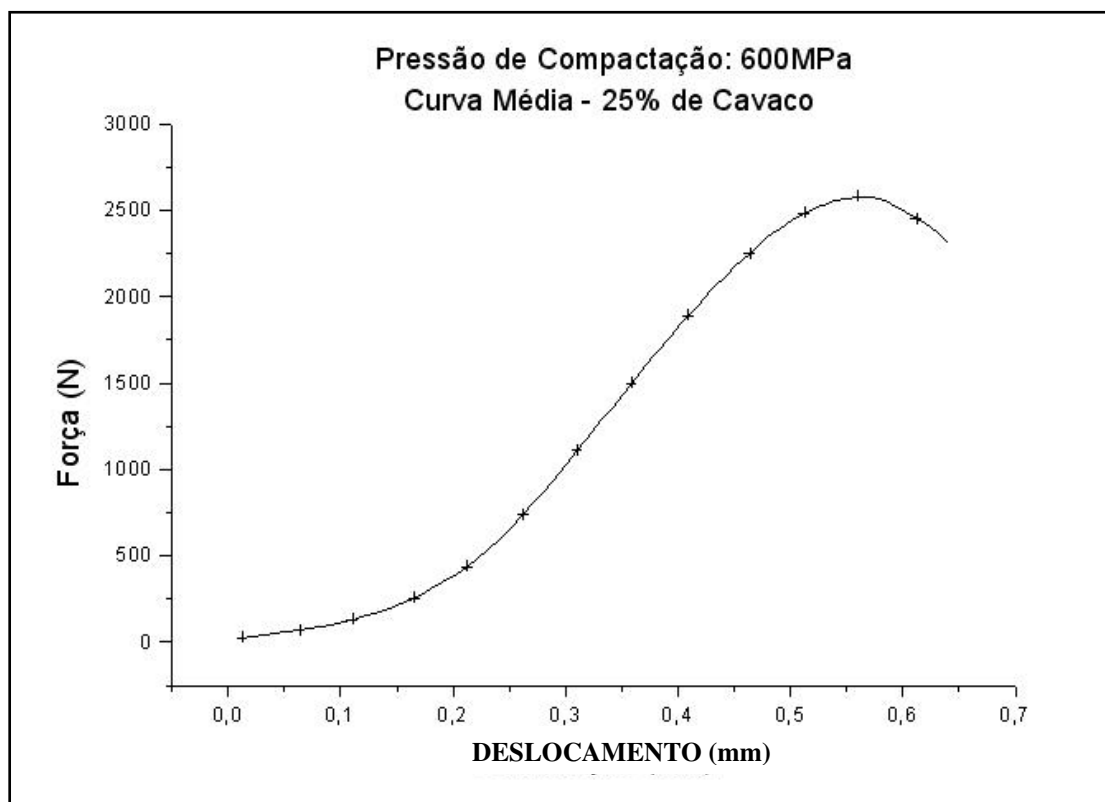


FIGURA 4.57- Curva média da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos dos ensaios dos corpos-de-prova contendo 25% de cavaco. Neste caso, a média das cargas máximas de ruptura foi de 2666N ($\sigma = 190\text{N}$) e a média dos deslocamentos foi de 0,57mm ($\sigma_\varepsilon = 5,5 \times 10^{-2}\text{mm}$).

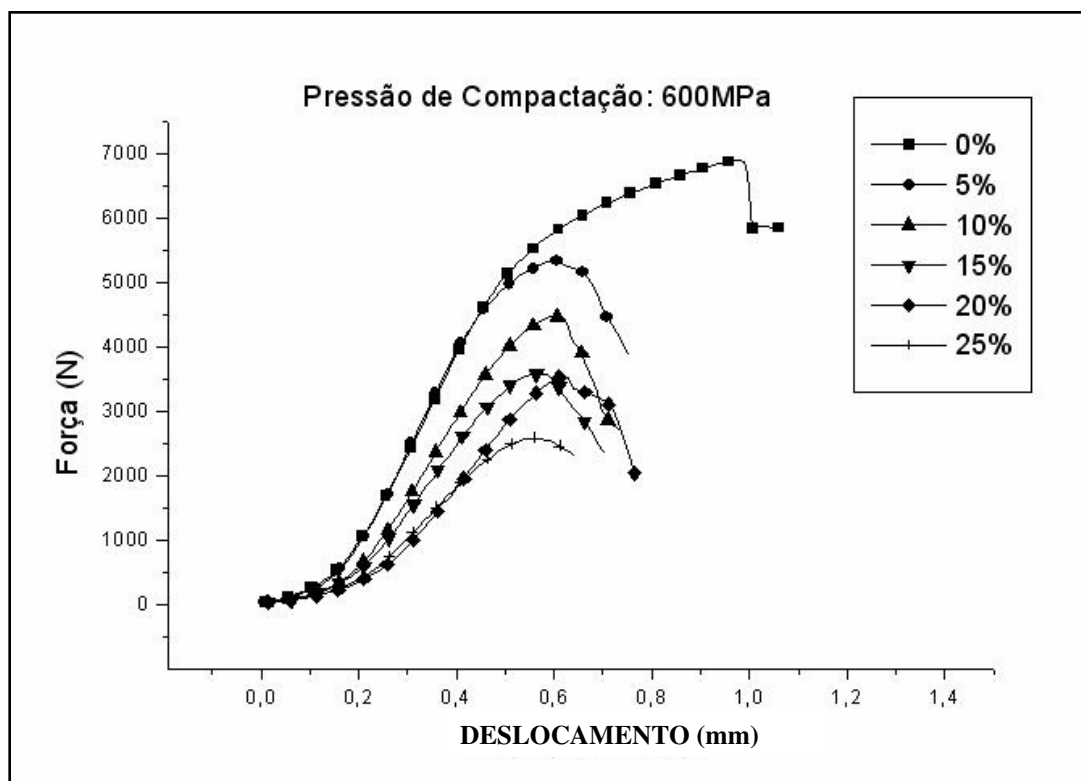


FIGURA 4.58- Curvas comparativas da força em função do deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio de flexão em três pontos, entre todos os gráficos das médias dos ensaios realizados.

4.2.2- Discussão das curvas médias de Cada Condição de Ensaio

A tabela 4.1, resume os valores médios das cargas máximas e dos módulos de ruptura médios dos corpos-de-prova -MOR, calculados a partir da equação (4.1), assim como as médias dos deslocamentos máximos do ponto de aplicação da carga. Já a tabela 4.2 resume os valores de força, em Newtons, que foram necessários para se deslocar o

ponto de aplicação da carga nos corpos-de-prova em 0,40; 0,50 e 0,60mm respectivamente.

$$MOR = \frac{3L}{2bh^2} F_{\max} \quad (4.1)$$

Na qual:

MOR = Módulo de ruptura;

L = espaçamento entre os pontos de apoio, dos corpos-de-prova, e que no presente caso é igual a 25,4mm;

b = largura do corpo-de-prova;

h = espessura do corpo-de-prova;

F_{máx.} = carga máxima suportada pelo corpo-de-prova.

TABELA 4.1- Valores das cargas médias de ruptura e de deslocamento máximo do ponto de aplicação da carga.

% de Cavaco	Carga média máx. [N]	Módulo de ruptura[MPa]	Desvio padrão σ [N]	Deformação média [mm]	Desvio padrão $\sigma\epsilon$ [mm] x 10 ⁻²
0,0%	7008	457	169	1,06	5,8
5,0%	5500	358	468	0,64	5,6
10,0%	4632	302	293	0,63	7,6
15,0%	3705	241	407	0,56	4,8
20,0%	3640	237	328	0,64	5,2
25,0%	2666	174	190	0,57	5,5

TABELA 4.2- Valores das cargas médias que foram necessárias para se deslocar o ponto de aplicação da carga, nos corpos-de-prova em 0,40; 0,50 e 0,60mm respectivamente.

%cavaco	ϵ [mm]	F [N]	%cavaco	ϵ [mm]	F [N]	%cavaco	ϵ [mm]	F [N]
0,0	0,40	4000	5,0	0,40	4086	10,0	0,40	2927
	0,50	5115		0,50	4963		0,50	4000
	0,60	5916		0,60	5478		0,60	4496
15,0	0,40	2572	20,0	0,40	1757	25,0	0,40	1794
	0,50	3385		0,50	2773		0,50	2512
	0,60	**		0,60	3594		0,60	**

** NESTES CASOS, OS CORPOS-DE-PROVA JÁ SE HAVIAM ROMPIDO.

A seguir serão discutidos os valores da diminuição da resistência mecânica em valores percentuais, comparado com as amostras sem cavaco. Ou seja: neste caso, assumiu-se que 7008N, é a carga máxima média, suportada pelos corpos-de-prova desprovidos de cavaco, e vale

100%. Nas amostras com 5,0% de cavaco em peso, a carga média máxima, foi de 5500N, neste caso, houve uma queda de 22% na resistência mecânica. Já, quando se tem 10,0% de cavaco, a diminuição da resistência mecânica é de 34,0%; com 15,0% ela é de 47,0%; com 20,0%, ela é de 49% , e finalmente, com 25,0% essa queda é de 61%.

Na tabela 4.1, observa-se que os valores das cargas médias máximas, [N], de ruptura para os casos com 15 e 20% de cavaco, são de 3705 e 3640N, respectivamente. Ou seja, uma diferença inferior a 2,0%. Já, na tabela 4.2, observa-se que para se deformar os corpos-de-prova em 0,5mm, para os mesmos casos, as cargas médias máximas são de 3385 e 2773N, respectivamente. Ou seja, uma diferença cerca de 18%. É possível que essa diferença deve-se à falta de homogeneidade do material.

É interessante observar que quando se têm 15 ou 20% de cavaco a resistência mecânica praticamente permanece constante.

Uma análise da tabela 4.2 revela dados interessantes. Com 0,0 e 5,0% de cavaco, para se deformar os corpos-de-prova em 0,4mm, a carga permaneceu praticamente constante. 4000N. Já, para os mesmos 0,4mm, de deformação, com 10,0; 15,0; 20,0 e 25,0% de cavaco, as cargas necessárias foram: 2927; 2572; 1757 e 1794N. Ou seja, quedas percentuais de 27; 37; 56 e 55%, respectivamente.

A tabela 4.3 resume em termos percentuais, a queda da carga necessária para se deformar os corpos-de-prova em 0,4; 0,5 e 0,6mm. Neste caso, o valor máximo considerado, foi de 100%, relativo às amostras sem cavaco. Ou seja, com 0,0% de cavaco.

TABELA 4.3- Queda da carga necessária para se provocar um deslocamento do ponto de aplicaç, em 0,4; 0,5 e 0,6mm.

%cavaco	ϵ [mm]	%F[N]	%cavaco	ϵ [mm]	%F[N]	%cavaco	ϵ [mm]	%F[N]
0,0	0,40	100	5,0	0,40	***	10,0	0,40	27
	0,50	100		0,50	3		0,50	22
	0,60	100		0,60	7		0,60	24
15,0	0,40	37	20,0	0,40	56	25,0	0,40	55
	0,50	34		0,50	46		0,50	51
	0,60	**		0,60	39		0,60	**

%F[N]: Queda percentual da carga.

** Nesses casos, os corpos-de-prova já haviam se rompido.

***Valor não considerado.

4.2.3- Fotomicrografias – MO e MEV

Nesta secção são apresentadas algumas das fotomicrografias mais significativas obtidas através da microscopia óptica e de varredura, respectivamente. Poderão ser observadas regiões com interação metalúrgica bastante intensa, o que sugere zonas de sinterização de longo alcance, e também, interfaces não sinterizadas.

Vale aqui, ressaltar que essas interações metalúrgicas originaram-se a partir de reações no estado sólido, isto é, originaram-se a partir da sinterização das interfaces pó/pó e cavaco/pó numa temperatura de 1473K (1200°C), bem abaixo da temperatura de fusão do material, que se encontra na faixa de 1873K (1600°C).

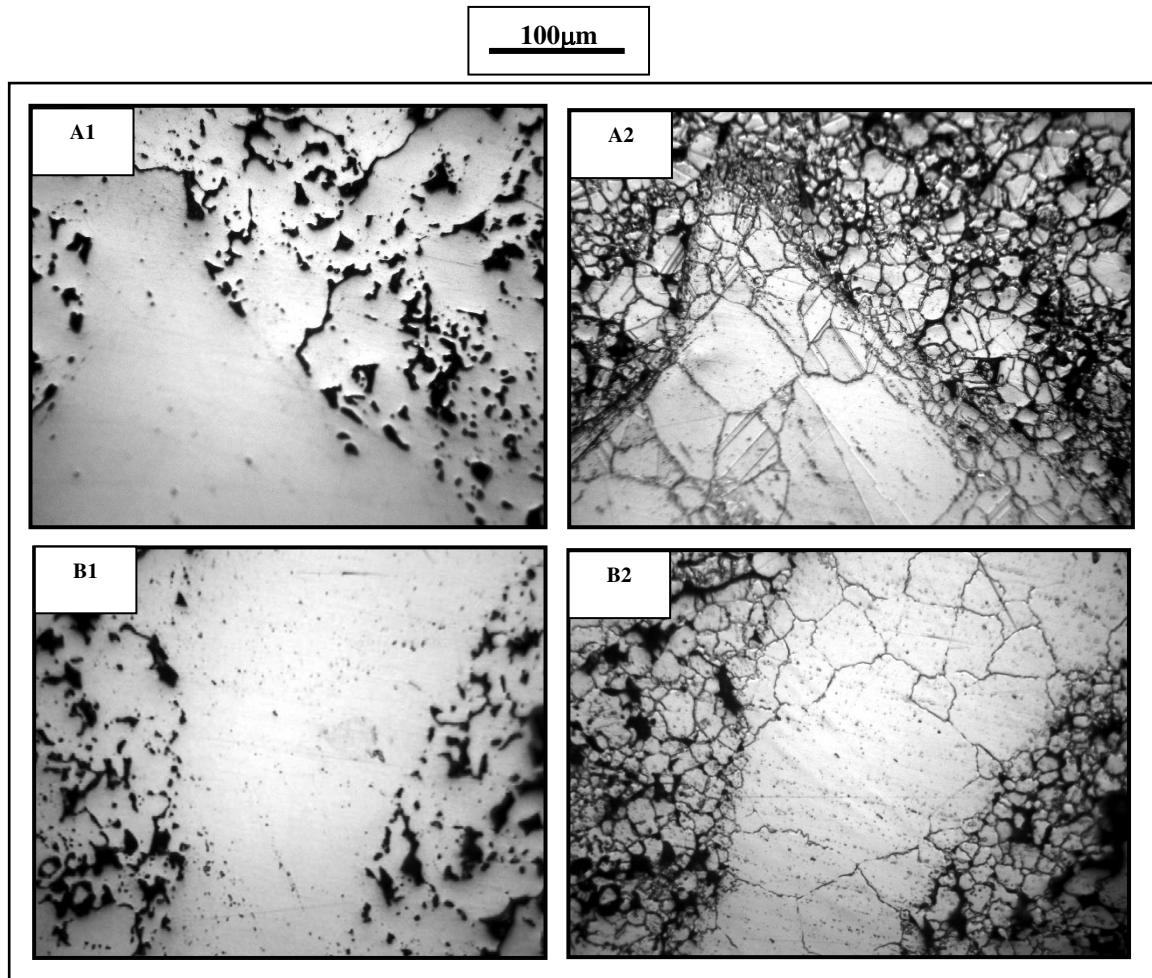


FIGURA 4.59- Fotomicrografias óptica de amostras de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados. A1 e B1, sem ataque. A2 e B2, com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40%, água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se áreas nas quais a sinterização foi muito eficiente. Amostra com 10% de cavaco.

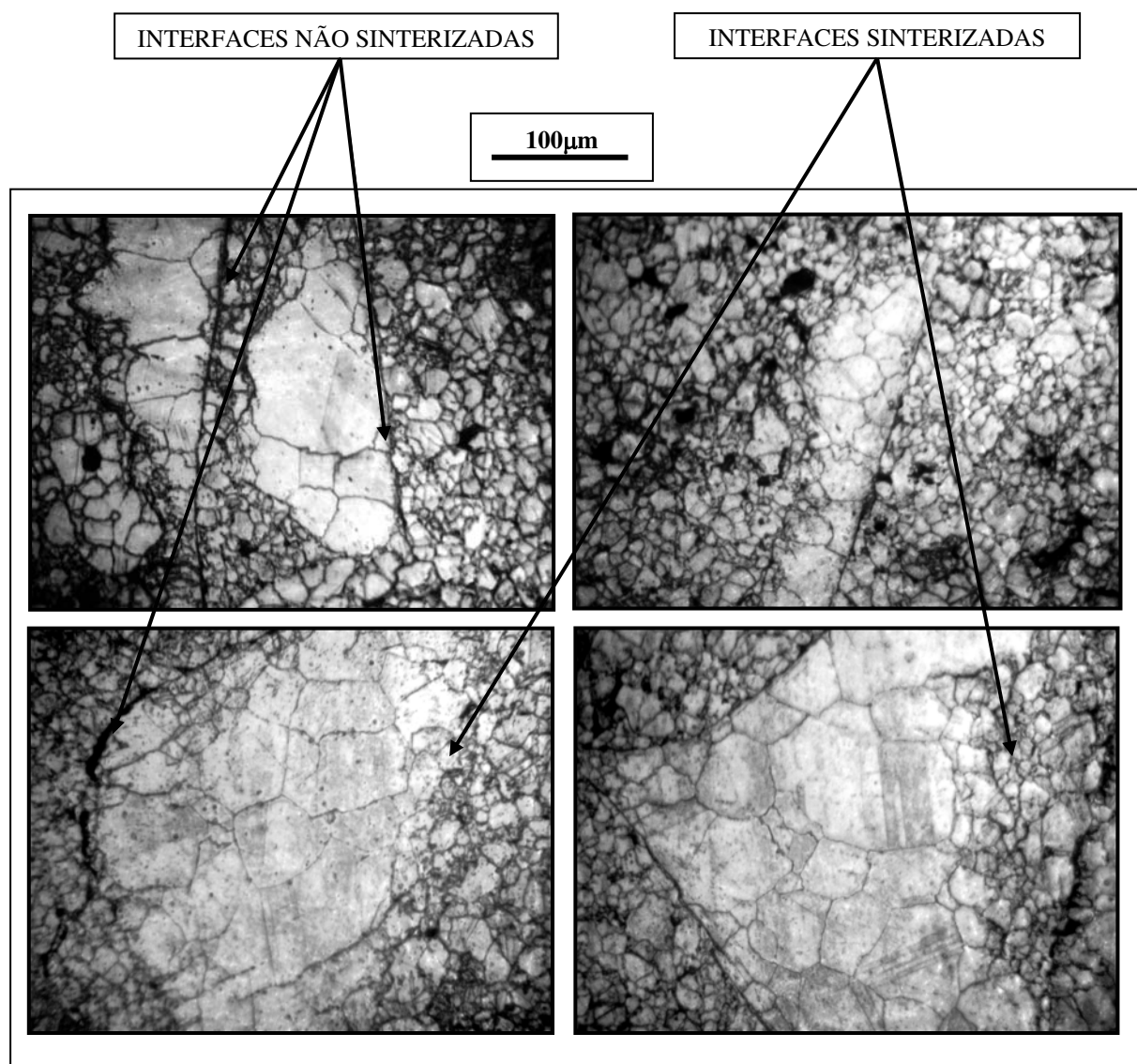


FIGURA 4.60- Fotomicrografias óptica de amostras de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material, sinterizados, todas com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40%, água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Observam-se nas regiões adjacentes aos cavacos (regiões mais claras), áreas com sinterização de longo alcance e observam-se também regiões não sinterizadas. Amostra com 20% de cavaco

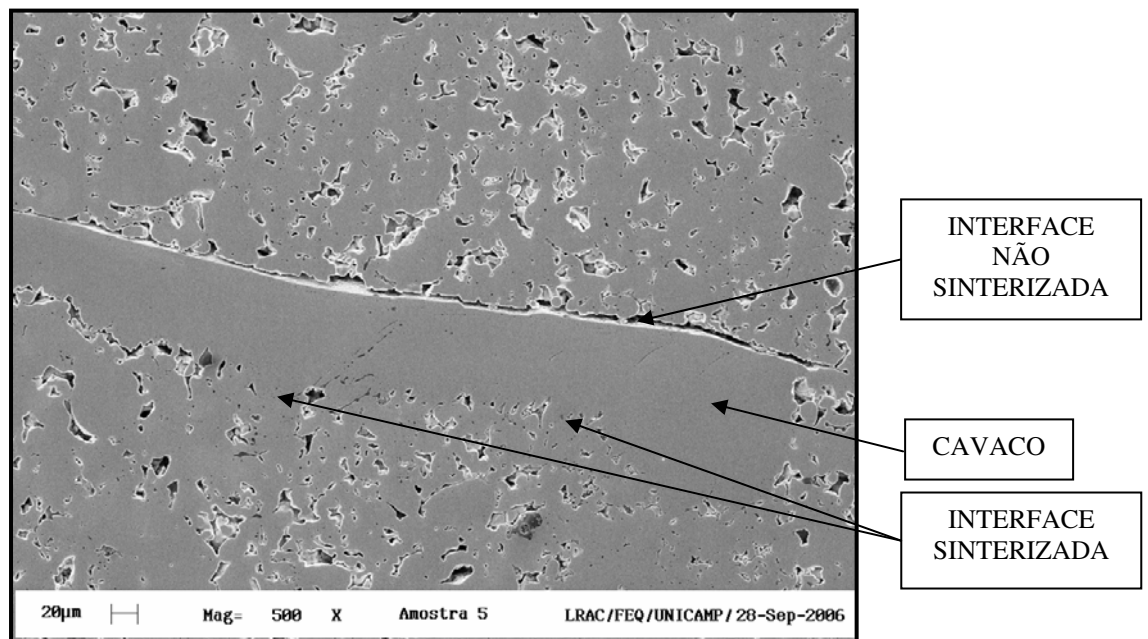


FIGURA 4.61- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance entre pó e cavaco e uma grande interface não sinterizada. 5% em peso de cavaco.

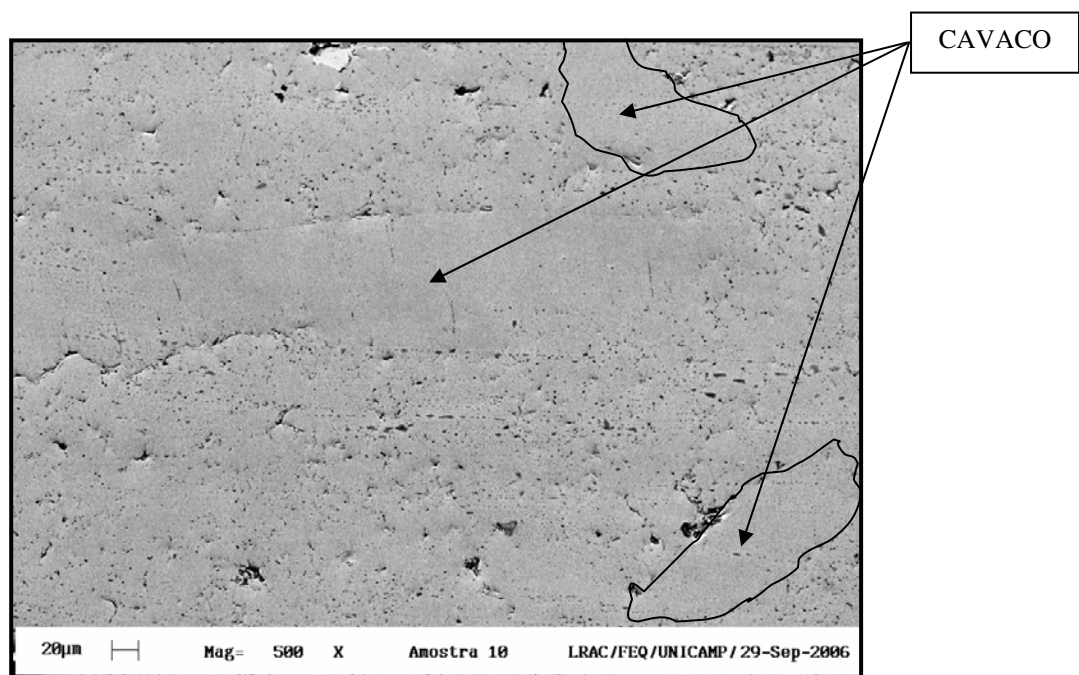


FIGURA 4.62- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se cavacos totalmente imersos na matriz . 10% em peso de cavaco.

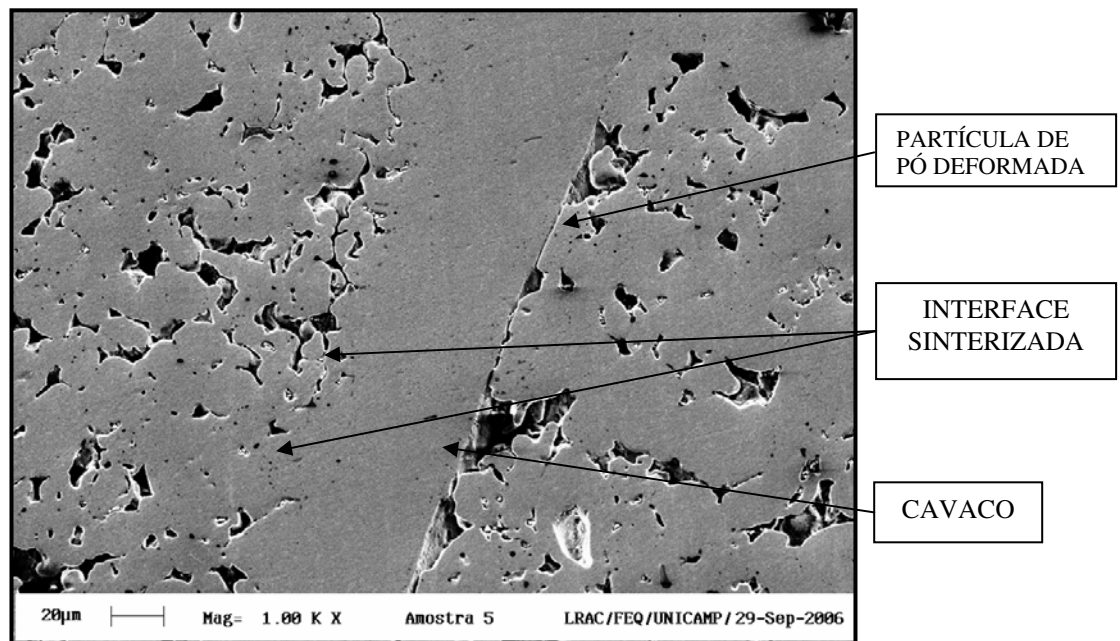


FIGURA 4.63- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Neste caso, é possível observar que houve deformação permanente do pó em contato com o cavaco. 5% em peso de cavaco.

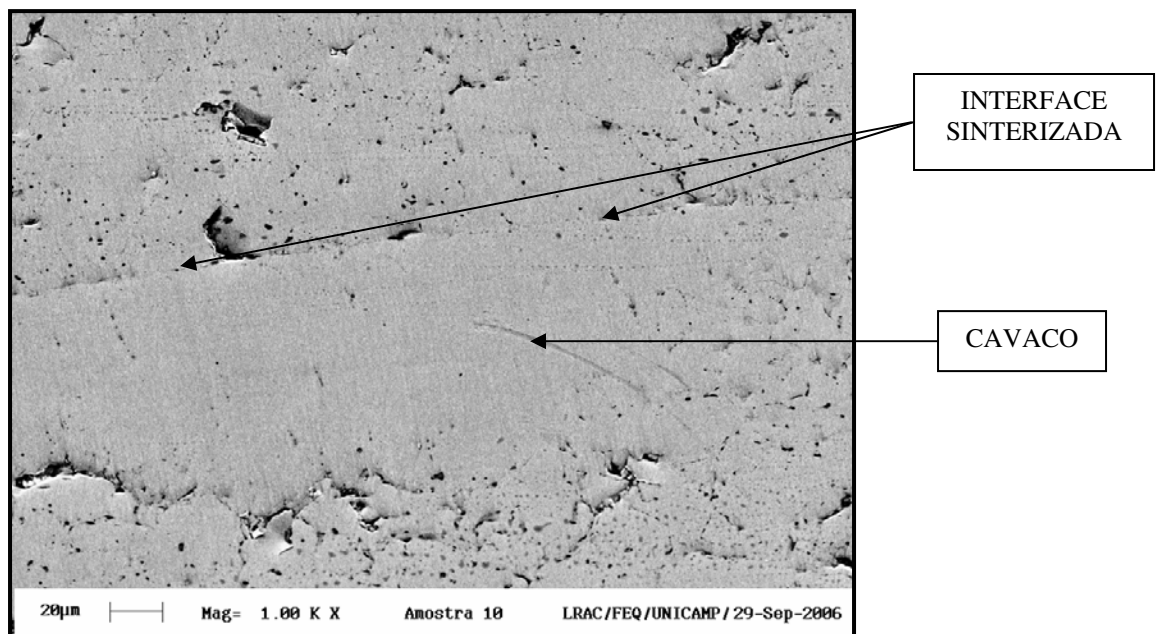


FIGURA 4.64- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observa-se que o cavaco está totalmente imerso na matriz, o que sugere que a sinterização, neste caso, foi bem sucedida. 10% em peso de cavaco.

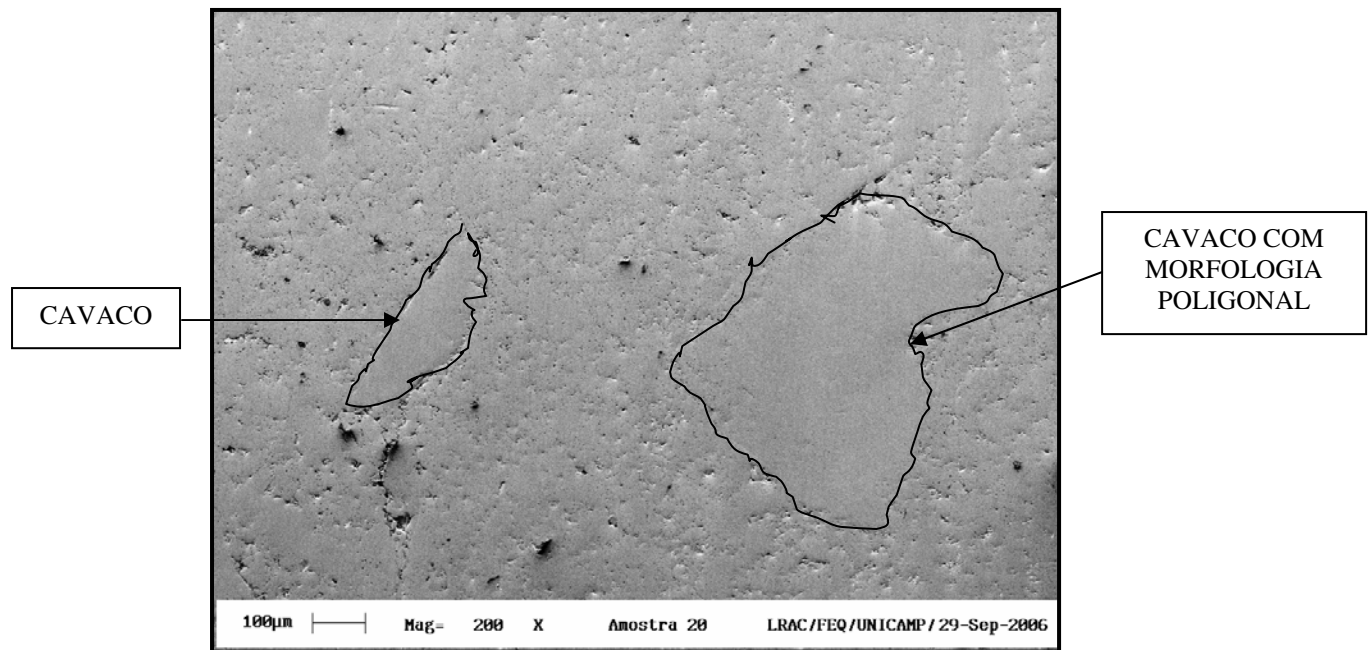


FIGURA 4.65- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observa-se um cavaco com morfologia poligonal, totalmente imerso na matriz constituída de pó sinterizado 20% em peso de cavaco.

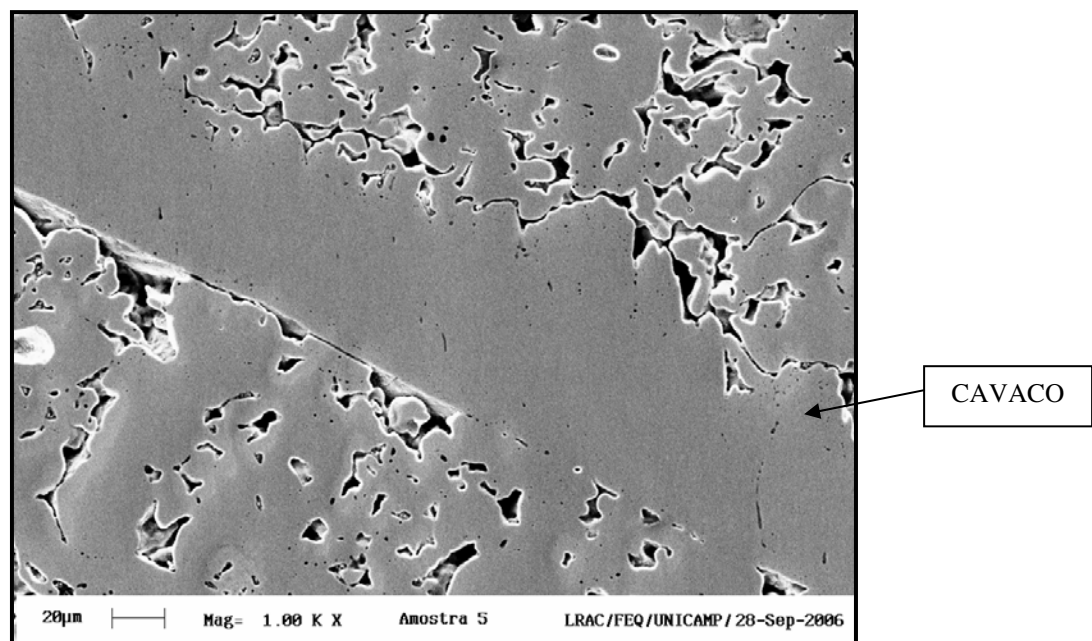


FIGURA 4.66- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observa-se uma região em que aparece uma partícula de pó deformada. 5% em peso de cavaco.

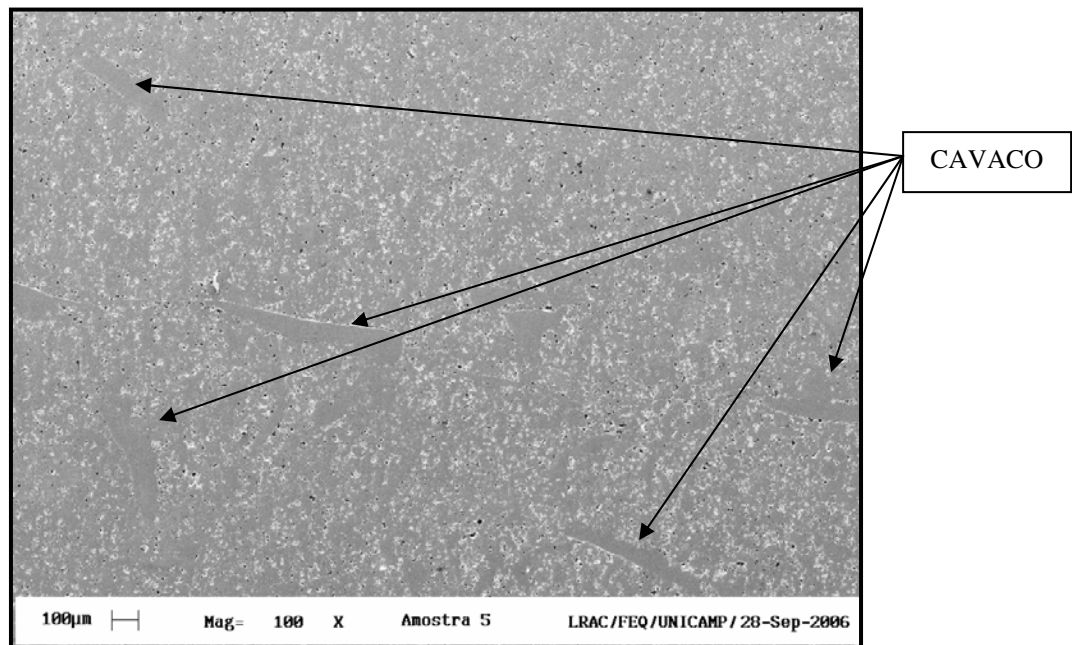


FIGURA 4.67- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance. 5% em peso de cavaco.

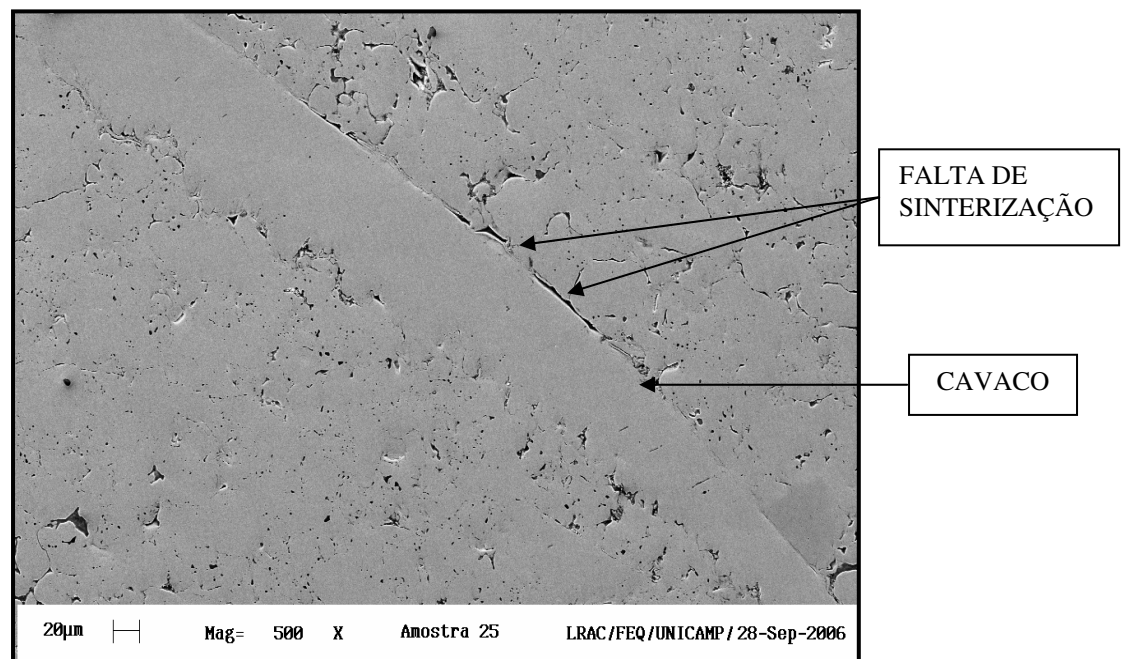


FIGURA 4.68- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance e áreas nas quais ocorreu a falta de sinterização. 25% em peso de cavaco.

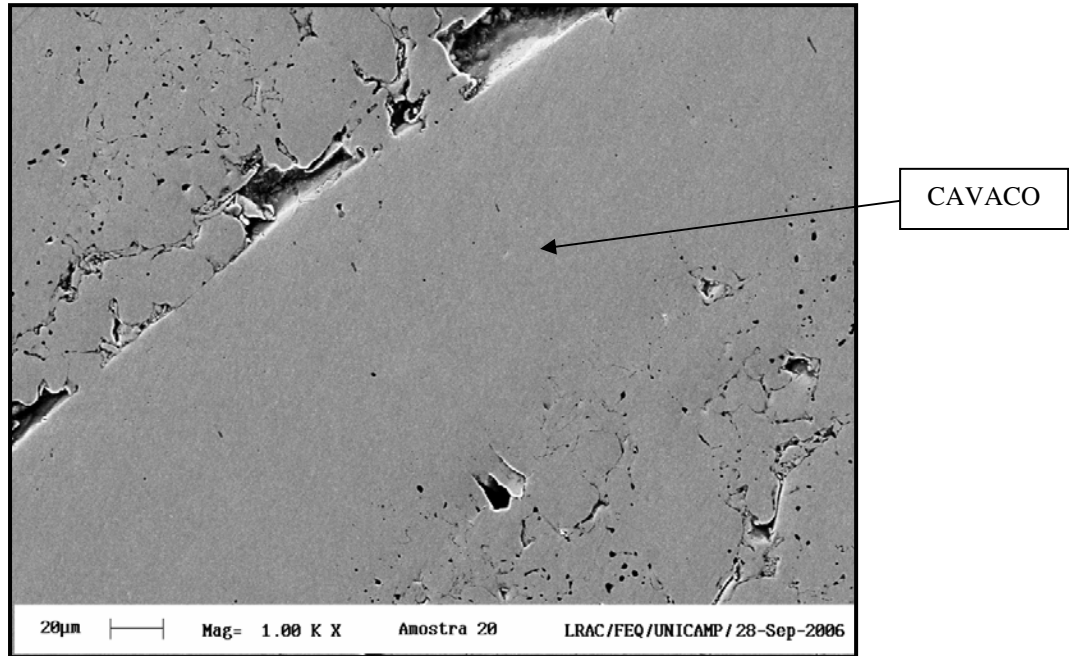


FIGURA 4.69- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance e uma região com falta de sinterização. 20% em peso de cavaco.

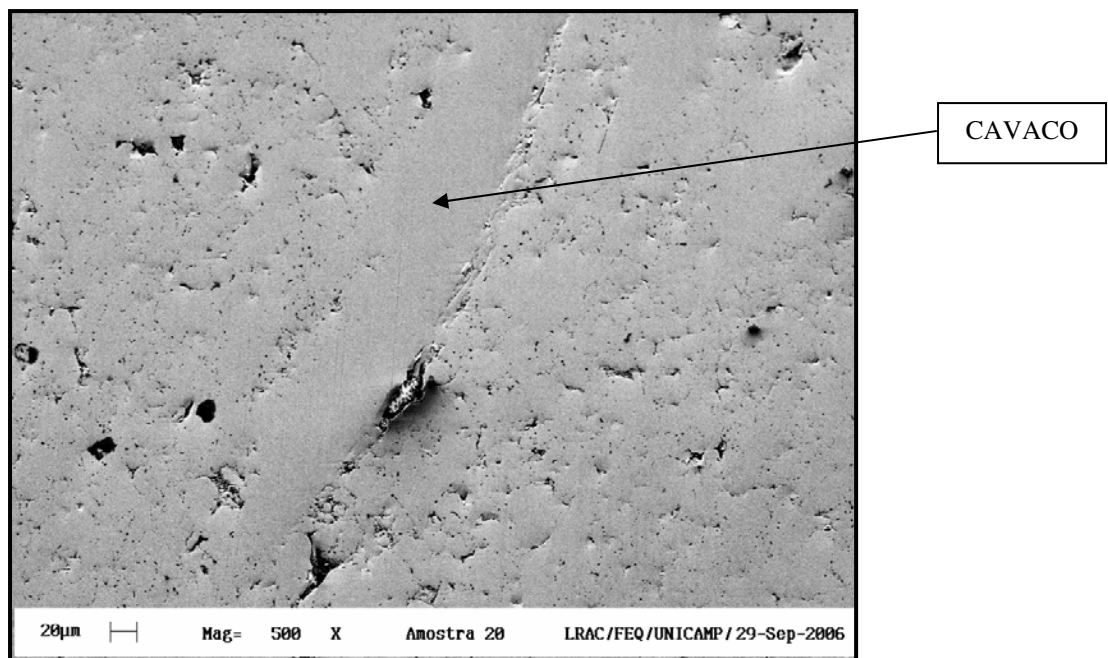


FIGURA 4.70- Fotomicrografia obtida por MEV, de amostra de cavaco de aço inoxidável austenítico AISI 316L e de pó do mesmo material sinterizados, sem ataque. Observam-se áreas com sinterização de longo alcance. 20% em peso de cavaco.

4.2.4- Análise e discussão das fotomicrografias apresentadas

Aqui serão analisadas as figuras de 4.59 a 4.70 que apresentam algumas das fotomicrografias mais expressivas deste trabalho. Nestas análises, o aço inoxidável austenítico AISI 316L será simplesmente denominado: aço inox, assim como o pó do aço inoxidável aqui utilizado, será simplesmente denominado: pó.

A figura 4.59 apresenta uma microestrutura obtida através da microscopia óptica, na qual se observam dois cavacos do aço inox circundado de pó, completamente sinterizados. As fotomicrografias A₁ e B₁, se apresentam sem ataque químico pois tratam-se de amostras simplesmente polidas nas quais é possível identificar-se as regiões pó/pó e cavaco/pó, sinterizadas. As regiões mais escuras representam poros, que são inerentes a esse tipo de material.

As fotomicrografias A₂ e B₂ representam as anteriores, com ataque eletrolítico em solução de ácido nítrico P.A 40%, água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos. Nesta fotomicrografia, observam-se perfeitamente os contornos-de-grãos no interior das partículas de pó e no interior do cavaco, observam-se também as interfaces sinterizadas. É interessante notar que o tamanho médio dos grãos das partículas de pó, é bem menor do que o tamanho médio dos grãos que compõem os cavacos. Isto, provavelmente, se deve ao fato de que na atomização o resfriamento é muito rápido, limitando o crescimento e o coalescimento dos grãos que compõem o pó. Nestas fotomicrografias, pode-se observar que a sinterização foi bastante intensa. Isto, provavelmente se deve ao fato de que na compactação tanto o cavaco quanto o pó foram deformados a frio, isto é, encruados e que durante a sinterização deu-se a recristalização que possivelmente aumentou a coerência da estrutura cristalina do cavaco, com a matriz, ou seja: entre cavaco e pós. Estudos posteriores deverão elucidar melhor essa questão.

A figura 4.60 apresenta quatro microestruturas, atacadas eletroliticamente em solução de ácido nítrico P.A 40%, água destilada 60% e tensão de 1,2 volts por um período de noventa segundos, nas quais se observam cavaco do aço inox circundado de pó, sinterizados. Nestes casos, observam-se regiões de interação metalúrgica bastante intensas, portanto, regiões

intensamente sinterizadas. Por outro lado, existem as regiões indicadas pelas setas, nas quais praticamente não houve sinterização. Isto pode ser explicado de duas maneiras: a) existiram falhas na compactação do material; b) houve contração do material, tanto do pó, quanto do cavaco, o que é muito comum em materiais sinterizados.

Na figura 4.61 observa-se que a interface inferior do cavaco de aço inox, está quase que totalmente sinterizada, ao passo que há falta de sinterização ao longo de toda a extensão da sua parte superior. Esta parte superior do cavaco, aparece como se fosse uma superfície livre aonde provavelmente não houve contato direto com a ferramenta no instante do corte.

Na região central da figura 4.62 verifica-se um cavaco de aço inox alongado que se estende ao longo de quase toda a extensão da fotomicrografia. Observam-se também dois outros cavacos menores demarcados por um risco. A sinterização foi bastante intensa, tanto é que fica bastante evidenciado que os cavacos ficaram quase que totalmente imersos na matriz composta pelo pó sinterizado.

Na figura 4.63 observa-se que à esquerda do cavaco, a sinterização se deu de maneira bastante intensa, o que não foi o caso do lado direito do cavaco onde se observa que a sinterização praticamente não ocorreu. Uma hipótese plausível é que neste caso também ocorreu a contração do material, pois é possível notar que o pó adjacente ao cavaco mantém sinais de que ele foi deformado no instante da compactação do corpo-de-prova.

Na figura 4.64 observa-se um cavaco de aço inox, quase que totalmente imerso na matriz, o que indica que houve sinterização de longo alcance. Porém, pode-se perceber também, algumas pequenas regiões nas quais existiu falhas na sinterização.

A figura 4.65 exhibe dois cavacos sendo que um deles tem a morfologia poligonal que aparentemente ficou quase que totalmente sinterizado. A morfologia poligonal pode ser a mais adequada, devido à sua simetria. No caso dos cavacos onde o comprimento é consideravelmente maior do que a largura, é possível, como foi comentado anteriormente, que a contração seja maior nesta direção.

Na figura 4.66 observa-se um novo caso em que ocorreu a sinterização parcial do cavaco com pó. É possível verificar que aparentemente houve a contração do material, em algumas regiões e que isso pode ter provocado a falta de sinterização dessas regiões.

Na figura 4.67 observa-se que com um aumento de 100 vezes, é possível identificar vários cavacos distribuídos na estrutura do material, indicados pelas setas.

Na figura 4.68 observam-se áreas com sinterização de longo alcance e áreas nas quais ocorreu a falta de sinterização. A falta de sinterização provavelmente se deu ou devido a falhas na compactação da mistura de pó com cavaco do aço inox, ou devido à contração do material, tanto do pó, quanto do cavaco.

Na figura 4.69 observam-se áreas com sinterização de longo alcance e uma região com falta de sinterização. Nesse caso, devido à falta de deformação do pó, é fácil concluir que este não teve contato com o cavaco, portanto, houve falha na compactação da mistura de pó com cavaco, naquela região.

Na figura 4.70 observam-se grandes áreas, nas quais a sinterização entre pó e cavaco, ocorreu intensamente. Observa-se também, uma grande quantidade de poros, o que é inerente a esse tipo de material.

A morfologia poligonal do cavaco pode ser vantajosa, uma vez que como não há predominância de medidas, ou seja: a dimensão da largura se confunde com a dimensão do comprimento, o que leva à conclusão de que a diferença de contração numa dada direção, é desprezível.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo, são apresentadas as conclusões fundamentadas nos resultados dos ensaios de flexão apoiados em três pontos e nas observações realizadas nas fotomicrografias obtidas da microscopia óptica e da microscopia eletrônica de varredura.

5.1. Conclusões

O presente trabalho indicou que a reciclagem de cavaco do aço inoxidável austenítico AISI 316L misturados ao pó deste mesmo material, pode ser uma rota alternativa para o reaproveitamento do cavaco deste tipo de material, via Metalurgia do Pó. Dos resultados obtidos concluiu-se que:

- A resistência mecânica dos corpos-de-prova diminui à medida que se aumenta a porcentagem em massa de cavaco de inox;
- Observa-se que quando se acrescenta 15 ou 20% de cavaco de inox em massa ao pó desse mesmo material, a resistência mecânica sofre uma pequena alteração, se comparada com as alterações ocorridas com os corpos-de-prova que possuem a mesma variação da porcentagem de cavaco adicionada. Ou seja: 5 e 10%; 20 e 25%;
- A deformação sofrida pelos corpos-de-prova produzidos com pó puro, ou seja, 0% de cavaco é muito maior quando comparada com os outros corpos-de-prova produzidos a partir da mistura pó + cavaco. Porém, à medida que se vai aumentando a porcentagem de cavaco não há evidências de variação apreciável dessa deformação;

- Os melhores resultados foram com 5,0% de cavaco, onde se verificou uma queda próxima de 22% na resistência mecânica;
- Na maioria dos casos, o material se apresentou bastante heterogêneo, no que diz respeito às interfaces pó/cavaco;
- A morfologia poligonal pode ser a mais adequada, devido à sua simetria, pois não há predominância, isso está muito bem evidenciado nas fotomicrografias da figura 4.59;
- A utilização da mistura pó + cavaco de aço inox torna-se viável para certos tipos de peças e para algumas aplicações. Além disso, percebe-se também que além da vantagem financeira, o uso do cavaco é uma forma de se diminuir o impacto sobre o meio ambiente, diminuindo a quantidade de resíduos sólidos, que é uma preocupação cada vez mais crescente nos dias atuais.

Como continuação deste trabalho, estão sendo conduzidos outros experimentos que possibilitarão um melhor entendimento desse processo que pode representar uma rota alternativa na reciclagem de cavacos de outros metais, racionalizando-se assim, a utilização de energia, com benefícios para o meio ambiente.

5.2- Sugestões de Trabalhos Futuros

O trabalho aqui apresentado conduz a uma série de outras sugestões de trabalhos que poderão ser empreitados, e que estão listadas em seguida:

- Verificar a variação da densidade devido à presença de cavaco;
- estudar os efeitos da granulometria do pó metálico na resistência à flexão em três pontos e na sinterabilidade;
- estudar os efeitos do tamanho médio do cavaco no comportamento mecânico;
- estudar os efeitos da adição de outros metais;
- estudar a influência da pressão de compactação;
- estudar a influência do tempo de sinterização;
- estudar a influência da temperatura de sinterização;
- estudar a influência da atmosfera de proteção contra a oxidação;
- estudar a influência da fração volumétrica dos poros;
- determinar qual seria a pressão de compactação para que a resistência se iguale à condição sem cavaco – pressão de compactação equivalente;
- estudar possíveis regiões de sinterização cavaco/cavaco;
- estudar a interface entre o cavaco e o pó – Microscopia Eletrônica de Transmissão;
- estudar a possibilidade de se compactar e de se sinterizar apenas cavaco, sem pó;
- estudar os micromecanismos de fratura de corpos-de-prova rompidos;
- estudar o comportamento tribológico do material;
- estudar os efeitos da corrosão;
- determinar certas propriedades do comportamento mecânico tais como: módulo de elasticidade e limite de escoamento;
- estudar o comportamento do material quanto à resistência ao impacto – ensaio Charpy instrumentado;
- estudar os efeitos da compactação isostática a frio e a quente, no material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kempton H.R., "*Powder Systems and Applications*", ASTM, Metals Handbook, vol. 7, 9 ed., p.p.568-574, Ohio, 1988.
- [2] Kaysser W.A., "*Solid State Sintering*", The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview, p.p.45-53, London, 1991.
- [3] Delforge D.Y.M., Ferreira I., Silva C.G.R., Paris E.A.G., Novaes R.H., "*Sintering by Means of Powder Metallurgy of the Scrap and Powder 316L Stainless Steel Mixture*", XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT - Foz do Iguaçu, 2006.
- [4] Blaine, Deborah C; Park, Seong Jin; Suri, Pavan; German, Randall M. "*Application of Work-of-Sintering Concepts in Powder Metals*" Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37A, pp. 2827-2836, Sept. 2006.
- [5] Dewidar M.M., Yoon H.C., Lim J.K., "*Mechanical properties of metals for biomedical applications using powder metallurgy process: A review*", Metals and Materials International 12 (3): 193-206 jun 2006.
- [6] Bochín G.F. and Lindskog, P.F., "*Applications and Developments of Sintered Ferrous Materials*", The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview, p.p 287-295, London, 1991.
- [7] White G.D., "*State-of-the-North American P/M Industry – 2001*", The International Journal of Powder Metallurgy, vol 37, n.4, p.p. 33-41, 2001.
- [8] Stauder, F., "*La Metallurgie des Poudres*", European Powder Metallurgy Association, 2006
E-mail: stauder@champagne-ardenne.cci.fr (pesquisado no dia 16/02/2007).

- [9] Zapata W.C., "*Estado Atual da Metalurgia do Pó*", ABM, Revista da Metalurgia, vol.43, nº 361, 1987.
- [10] Ghadiri M., Farhadpour, F.A., Clift R., and Seville J.P.K., "*Particle Characterization Size and Morfology*", The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview, p.p.56-75, London, 1991.
- [11] Powder Metallurgy – An Overview 1^aed., The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, London, Great Britain, 1991.
- [12] Lenel F.V., "*The Early Stage of the Mechanism of Sintering*", in Powder Metallurgy for High-Performance Application", Syracuse University Press, p.p.119-137, Binghamton, N.Y., 1972.
- [13] Metals Powder Industries Federation, "*Method for Determination of Transverse Rupture Strength of Sintered Metal Powder Test Specimens*", 105 College Road East, Princeton, N.J., 08540, USA, 1988.
- [14] Patel, K.B., "*Flow Rate of Metal Powder*", ASTM, Metals Handbook, vol 7, 9 ed., p.p.275 - 281, Ohio, 1988.
- [15] Soper, W.E., "*Tap Density of Metal Powder*", ASTM, Metals Handbook, vol 7, 9 ed., p.p.278 - 281, Ohio, 1988.
- [16] Metal Powder Industries Federation, "*Method for Tension Test Specimens for Pressed and Sintered Metal Powder*", Princeton, N.J., 08540, USA, 1985.
- [17] Metal Powder Industries Federation, "*Method for Determination of Green Strength of Compacted Metal Powder Specimens*", Princeton, N.J., 08540, USA, 1985.
- [18] Johnson, P.K., "*Metal Powder Shipments Increasing*", NEWS, Chicago IL, USA, 2004. E-mail: pjohnson@mpif.com (pesquisado no dia 12/02/2007).

- [19] Price P.E., Kahler S.P., “*Hot Isostatic Pressing of Metal Powder*”, ASTM, Metals Handbook, vol.7, 9ed.,p.p.419 - 450, Ohio, USA, 1988.
- [20] Yoon, D.N. & Uppmann, W.J.,”*Grain Growth and Densification during liquid Phase Sintering of W-Ni*”, Acta Metall.,27, 693, 1979.
- [21] Crease A.P.,”*Production Sintering Equipment*”, ASTM, Metals Handbook, vol7, 9ed.,p.p.351-359, Ohio,USA,1988.
- [22] Kipouros G.J., Caley E.F.,Bishop D.P., “ *On the Advantages of Using Powder Metallurgy in New Light Metal Alloy Design*”, Metallurgical and Materials Transactions A vol 37a, p.p. 3429 december 2006.
- [23] Informativo Técnico Metalpó, “*Metalurgia do Pó*”, Metalpó Ind. e Com. Ltda., Estrada do Jaraguá, 453, Pirituba, SP, 2005.
- [24] Delforge, D.Y.M., Ferreira, I., Souza, D.L., ”*Reciclagem de cavaco de ligas de cobre via metalurgia do pó*” - Revista Máquinas e Metais, v. 40, n. 465, p. 182-189, 10/2004 – tiragem: 15.000 Exemplares.
- [25] Ambrósio Filho, Revista “PESQUISA” – FAPESP, Julho 2006 – ed. 125 – São Paulo – Brasil.
- [26] Gronostajski J.Z., Kacsmar J.W., Marciniak H., Matuszak A., ”*Production of Composite from Al and AlMg2 Alloy Chip*”, Journal of Materials Processing Technology, 77, p.p. 37 – 41, 1998.
- [27] Gronostajski J.Z.,Matusak A., “*The Recycling of Metals by Plastic Deformation: an Example of recycling of Aluminium and its Alloys Chips*”, Journal of Materials Processing Technology, 92 – 93, p.p. 35 – 41, 1999.

- [28] Gronosttajski J.Z., Marciniak H., Matuszak A., "New *Methods of Aluminium and Aluminium-alloy Chip Recycling*", Journal of Materials Processing Technology, 106, p.p. 34 – 39, 2000.
- [29] Chmura W., Gronosttajski J.Z., "Mechanical and Tribological Properties of Aluminium-base Composite Produced by the Recycling of Chip", Journal of Materials Processing Technology, 106, p.p. 23 – 27, 1998.
- [30] Gronosttajski J.Z., Marciniak H., Matuszak A., Samuel ., "Aluminium-ferro-chromium Composite Produced by recycling of chip", Journal of Materials Processing Technology, 119, p.p. 251 – 256, 2001.
- [31] Lawley, Alan (Laboratory Services, Hoeganaes Corporation), Murphy, Thomas F. "Metallography of powder metallurgy materials", Materials Characterization, v 51, n.5, p 315-327, December, 2003.
- [32] Powder Metallurgy 2006 FACTS - METAL POWDER - INDUSTRIES FEDERATION 105 COLLEGE ROAD EAST PRINCETON, NEW JERSEY 08540-6692 USA WEB. Disponível em: www.mpif.org (pesquisado em 12/04/2007).
- [33] Kempton H.R., "Powder Systems and Applications", ASTM, Metals Handbook, vol. 7, 9^a ed., Ohio, USA, p.p.15 – 19, 1988.
- [34] Dunkley J.J., "Atomization of Metals Powders", The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview, p.p.56-75, London, 1991.
- [35] Boyer, H.E., "Secondary Operations Performed on P/M Parts and Products ", ASTM, Metals Handbook, vol. 7, 9^a ed., p.p. 451 - 462, Ohio, USA, 1988.

- [36] Liu L, Loh NH, Tay BY, et al. “*Mixing and characterisation of 316L stainless steel feedstock for micro powder injection molding*”, MATERIALS CHARACTERIZATION 54 (3): 230-238 MAR 2005.
- [37] Klar, E., “*Chemical Method of Powder Production*”, ASTM, Metals Handbook, vol 7, 9 ed., p.p.52-55, Ohio, 1988.
- [38] Haranczyk I., Karwan J., Baczewjka L., “*New Electrochemical Method of Obtaining Homogenous, Fine Grained Metal Powder*”, Powder Metallurgy, vol. 49, n.1, p.p. 78 – 85, 2006.
- [39] Bronzes Filter Powders, ALCAN METAL POWDER, Division of Alcan Aluminium Corporation, 2002.
- [40] L.P. Barbosa & F. Ambrósio Filho, “*Permeabilidade e capacidade de retenção em filtros porosos*”, IPEN-CNEN/SP, 2001.
- [41] Gentile E.F., Ramos J.O.jr., Kanada K., Takano C., “*Permeabilidade de bronzes sinterizados para filtros*”, XXXIV Congresso Anual da ABM; Porto Alegre RS, julho de 1979.
- [42] Wilyman P.Q., Vandermeiren M., “*Selection of atmospheres for sintering*”, The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy - An Overview, p.p.208-218, London, 1991.
- [43] Blais C., De Rege, B., “*The influence of furnace atmosphere on the chemistry of additives to powders made for improved machinability*”, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N.J., 08540, p.p., 15-29/15-42, USA, 1997.
- [44] Dwyer J., Nayar H.S., Saxena N., “*Argon employing sintering process for prevention of nitriding*”, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N.J., 08540, 14-47/14-54, USA, 1997.

- [45] Paterson A.J.F., Smith C.G., “*An appraisal of gaseous carrier for carburising*” heat treatment of metal, 2, p.p., 27-32, 1981.
- [46] Li, S., Huang, D., Liang, S., Zhou, H., “*Influence of sintering atmospheres on densification process of injection moulded gas atomized 316L stainless steel Powder Metallurgy*, vol.46, n.3, pp.241-245, 2003.
- [47] Thompson C.B., “*Lubrication of Metal Powder*”, ASTM, Metals Handbook, vol 7, 9ed., p.p.190-193, Ohio,USA,1988.
- [48] Delforge. D.Y.M., “*Introdução à Metalurgia do Pó*”, Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista – UNESP. (Curso) 2004.
- [49] Nayar, H.S., “*Production of Sintering Atmosphere*”, ASTM, Metals Handbook, vol 7, 9ed.,p.p.339 - 350, Ohio, USA, 1988.
- [50] Bautista, A. (Materials Science Department, Universidad Carlos III de Madrid); Velasco,F.; Campos, M.; Rabanal, M.E.; Torralba, J.M., “*Oxidation behavior at 900°C of austenitic, ferritic, and duplex stainless steels manufactured by powder metallurgy*”, *Oxidation of Metals*, v 59, n 3-4, April, p 373-393., 2003.
- [51] German, Randall M.; Campbell, L.G., “*Atmospheric oxidation corrosion of sintered artistic bronze*”, Powder Metallurgy, vol.49, n.2, pp. 40-47, 2006.
- [52] Catálogo de produtos sinterizados pela. Metalpó Ind. e Com. Ltda., estrada do Jaraguá, 453, Pirituba, SP, 2004.
- [53] Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, São Paulo, Ed.Artliber,2000.
- [54] FERRARESI, D., “*Fundamentos da Usinagem dos Metais*”, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, pp. 89-140, 1970.

- [55] Rodrigues, A.R., “*Estudo da Geometria de Arestas de Corte Aplicadas em Usinagem com Alta Velocidade de Corte*”, Ph.D. Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, S.P., Brasil, 227 p., 2005.
- [56] Machado, A. R., Silva, M. B, “*Usinagem dos Metais*”, 4. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia,. 224 p., 1999.
- [57] Lame O, Bouvard D, Wiedemann H., “*Analysis of shape changes of steel powder compacts during sintering*”, REVUE DE METALLURGIE-CAHIERS D’INFORMATIONS TECHNIQUES 99 (12): 1021-1032 DEC 2002.