

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO COPO
ACETABULAR DE PRÓTESES DE QUADRIL A PARTIR DA MOLDAGEM POR
SINTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por MARCELO DE CARVALHO
REIS e aprovada pela Comissão
Julgadora em 26 / 05 / 93.
A. CLIQUET JR., Ph.D.
Depto. de Engenharia Biomédica Orientador

Marcelo de Carvalho Reis 278

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-
Graduação como parte dos requisitos à obtenção do
título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador: Prof.Dr. Alberto Cliquet Jr. ^{Jurista}

CAMPINAS MAIO 1993



Aos meus irmãos Orlando e Gustavo, colaboradores na vida.
A meu pai Orlando (in memoriam) e minha mãe Irene, POR
TUDO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alberto Cliquet Jr. pela receptividade e confiança.

Ao Prof. Dr. José Augusto Marcondes Agnelli pela atenção e fundamental colaboração em diversas etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pela paciência, colaboração e espaço.

A Prof(a). Dr(a). Cecília Amélia Carvalho Zavaglia pela grande ajuda

Ao amigo Dietmar Armin Altwig pela mão estendida, fundamental neste trabalho.

Aos técnicos Rogério Marcom e Mauro Sérgio Martinazo pela grande colaboração com equipamentos e a confecção dos desenhos, respectivamente.

Ao técnico Eugênio Carlos Carrara e ao Eng. Alexandre H. Hermini do CEB.

Aos técnicos do DEMA-FEM, Sr. Antonio Laerte Struziato, José Luis Lisboa e a Rita Helena B. Jacon.

Ao técnico do DMC-FEM, Rodnei José de Aro Cintra.

Aos Profs. Drs. Rubens Caran Jr. e Antonio Celso F. Arruda.

A POLIALDEN PETROQUÍMICA S.A., na pessoa do Eng. Sérgio L. Pradez de Faria Jr. pelo fornecimento de matéria-prima.

A HOECHST DO BRASIL pelo fornecimento de matéria-prima

A FINEP, ao FAEP-UNICAMP e a FAPESP pelo suporte financeiro do trabalho e concessão de bolsa, respectivamente.

E a todos os colegas do DEMA-FEM e do DEB-FEE.

RESUMO

Objetivando o desenvolvimento de um processamento para o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) foi projetada, construída e testada a infra-estrutura básica, que possibilite processar o polímero em diferentes condições e ensaiá-lo a desgaste em condições que simulem uma articulação do tipo sinovial.

Para o processamento foi construída uma prensa pneumática que possibilita variação das pressões de compactação e um sistema de aquecimento com controle de temperatura.

Para os ensaios de desgaste foi construído um dispositivo tipo TRI-PIN-ON-DISC. O equipamento permite a realização de ensaios a seco ou em presença de fluido lubrificante, sendo a medida de desgaste efetuada pela perda em peso dos corpos de prova.

Foi, ainda, realizada a caracterização de polímeros nascentes de duas origens; nacional e alemã. Três aspectos foram estudados: determinação do tamanho médio de partículas, morfologia e topografia das partículas e comportamento térmico.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

| | |
|---|----|
| APRESENTAÇÃO | 1 |
| INTRODUÇÃO | 3 |
| CONCEITUAÇÃO TEÓRICA..... | 5 |
| ARTICULAÇÕES | 5 |
| POLÍMEROS | 7 |
| Os Polietilenos | 10 |
| O Polietileno De Ultra Alto Peso Molecular (Peuapm)..... | 11 |
| PROCESSAMENTO DO PEUAPM | 12 |
| DESGASTE DO PEUAPM..... | 19 |
| EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS | 23 |
| DESENVOLVIMENTO DE UMA PRENSA PARA MOLDAGEM DO PEUAPM | 23 |
| Sistema de Movimentação | 24 |
| Estrutura | 28 |
| Matriz de Moldagem | 29 |
| Sistema de Aquecimento e Isolamento Térmico | 30 |
| PROJETO DO DISPOSITIVO DE ENSAIO DE DESGASTE | 30 |
| Sistema de Ensaio e Carregamento | 32 |
| Sistema Motor | 34 |
| CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA | 36 |
| MATERIAL | 36 |
| METODOLOGIA | 36 |
| Determinação do Tamanho Médio das Partículas..... | 37 |
| Estudo da Morfologia e Topografia das Partículas | 38 |
| Estudo do Comportamento Térmico | 38 |
| RESULTADOS | 39 |
| Tamanho Médio das Partículas..... | 39 |
| Morfologia e Topografia das Partículas | 40 |
| Comportamento térmico | 45 |
| CONCLUSÃO QUANTO AO ESTUDO DA MATÉRIA PRIMA..... | 53 |
| PROCESSAMENTO E ENSAIO DE DESGASTE TESTANDO OS EQUIPAMENTOS | 56 |
| PROCESSAMENTO | 56 |
| ENSAIO DE DESGASTE | 60 |
| CONCLUSÃO QUANTO AOS TESTES..... | 62 |
| CONCLUSÃO | 63 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 64 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |
| APÊNDICE A..... | 70 |
| APÊNDICE B | 72 |
| APÊNDICE C | 75 |

APRESENTAÇÃO

Diversas áreas das ciências exatas têm sido aplicadas para o estudo de fenômenos biológicos e de problemas médicos. A utilização de conceitos de engenharia em medicina vem gerando ao longo de pouco tempo um substancial incremento nas possibilidades médicas. Além do desenvolvimento de equipamentos médico-hospitalares, ocorre também o desenvolvimento e a adaptação de materiais para uso em medicina e odontologia. O desenvolvimento de próteses de várias partes do corpo humano é um exemplo acabado do potencial da engenharia para uso em diferentes áreas médicas e também em odontologia.

Uma especialização de engenharia que tem sido bastante importante para o desenvolvimento de próteses em geral tem sido a Engenharia de Materiais. O uso cada vez mais constante de materiais artificiais para restaurar partes do corpo humano tem exigido o desenvolvimento de tecnologias diferenciadas para a fabricação de produtos que atendam às solicitações de materiais implantáveis. O nível de solicitação tecnológica nem sempre é tão elevado quanto em áreas como a engenharia aeroespacial, o que ocorre é a necessidade da adaptação de materiais já consagrados para uso em organismos vivos. O desenvolvimento de próteses ortopédicas representa bem este tipo de adaptação, onde diferentes ligas metálicas vem sendo, atualmente, utilizadas na confecção de próteses implantáveis, tendo sido, no entanto, desenvolvidas para uso aeronáutico.

A aplicação de polímeros em ortopedia também é um exemplo da adaptação de materiais já consagrados em áreas de engenharia. Os ditos polímeros de engenharia são hoje largamente aplicados, na ortopedia (próteses internas e externas, órteses, dispositivos de fixação para consolidação óssea, etc), em cardiologia (elementos de bombas de circulação extracorpórea, ventrículos artificiais, revestimentos de marca - passo implantáveis, etc), na urologia (membranas de filtragem de máquinas de hemodiálise, etc) cirurgia vascular (próteses diversas), etc.

Estas adaptações não se dão sem problemas, e sua consolidação exige pesquisa e desenvolvimento intrinsecamente ligado à aplicação. A necessidade de desenvolvimento de novos materiais e a adaptação de materiais já existentes para uso médico/odontológico levou ao desenvolvimento de uma nova área de pesquisa em tecnologia e ciência dos materiais: a dos biomateriais.

INTRODUÇÃO

Um processo de fabricação é uma metodologia de beneficiamento de matéria-prima visando a obtenção de um dado produto.

O desenvolvimento de um processo de fabricação é a busca da técnica que determine a metodologia de beneficiamento estando pré-estabelecidas algumas propriedades finais desejadas no produto. Assim os caminhos a serem percorridos nesta busca podem ser vários, dependendo das propriedades finais desejadas e dos recursos disponíveis.

A determinação da influência dos parâmetros de um processamento nas propriedades finais do produto e o esclarecimento dos mecanismos que regem esta influência fazem parte da otimização na busca das características objetivadas.

O Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) passou a ser utilizado em próteses de articulação devido à sua excelente biocompatibilidade e resistência ao desgaste. Porém mesmo com estas características, ocorrem complicações fisiológicas, tais como graves processos inflamatórios, relacionados à liberação de microfragmentos do polímero, gerados por mecanismos de desgaste.

No Brasil, a fabricação dos componentes protéticos, feitos a partir do PEUAPM, é realizada pelos fabricantes de próteses, a partir de chapas ou tarugos previamente moldados por outras empresas processadoras da resina de PEUAPM. Estas, por sua vez, produzem os moldados para uma vasta gama de diferentes usos industriais, os quais não requerem nenhum tipo de cuidado adicional no tocante ao grau de contaminantes que eventualmente estejam presentes na resina ou, até mesmo, passem a estar no polímero moldado.

Além de eventuais contaminações presentes no material utilizado pelos fabricantes de prótese, o procedimento de fabricação dos produtos finais é baseado em processos normalmente utilizados para metais, tais como torneamento e fresagem. Estes, por sua

vez, não fornecem bons acabamentos superficiais para termoplásticos, além de gerarem grande quantidade de material perdido, como característica intrínseca dos processos.

Este trabalho é o início do desenvolvimento de uma nova forma de fabricação de componentes de próteses ortopédicas, onde se objetiva dois pontos: otimização da resistência ao desgaste para as condições de uma prótese de quadril, e possibilitar a moldagem direta do produto em sua forma final, possibilitando uma conseqüente diminuição na probabilidade de contaminação do polímero e, eventualmente, redução em custos de fabricação.

A busca da otimização quanto à resistência ao desgaste é uma meta que envolve o desenvolvimento de toda uma infra-estrutura, através da qual possa-se processar o polímero e ensaiá-lo a desgaste na situação de simulação de uma articulação de quadril. Para tanto foram desenvolvidos o dispositivo e matriz para processamento do PEUAPM, onde é possível a variação de diferentes parâmetros de processamento, e o dispositivo para ensaio de desgaste, visando a simulação das condições da articulação de quadril.

Além do desenvolvimento da infra-estrutura necessária, foram ainda caracterizados materiais de dois diferentes fabricantes de PEUAPM. Pôde-se assim traçar um paralelo entre uma resina atualmente em uso, de origem alemã, e uma nacional de início de produção recente.

Em uma última etapa foram efetuados testes com os equipamentos desenvolvidos e levantados algumas características quanto ao comportamento do material na moldagem e em ensaios de desgaste.

CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

ARTICULAÇÕES

As articulações ou juntas humanas podem ser divididas em três grupos, de acordo com sua estrutura e mobilidade: juntas fibrosas (sinartroses) ou imóveis, juntas cartilagueiras (anfiartroses) ou com movimentos limitados, e juntas sinoviais (diartroses) ou juntas de movimentos amplos [1].

As juntas ou articulações sinoviais constituem a maioria das articulações do corpo humano, podendo ser classificadas de acordo com os eixos de movimento, ou graus de liberdade. As articulações sinoviais podem ainda, ser classificadas pelas formas das superfícies articulares dos ossos que as compõem. Desta forma o grupo das articulações sinoviais pode ser subdividido nos seguintes tipos [2]:

- Articulação plana
- Articulação em dobradiça ou Gínglimo
- Articulação Condilar
- Articulação Esferóide
- Articulação Elipsóide
- Articulação Selar

Nas juntas sinoviais as superfícies ósseas são revestidas por cartilagem articular e unidas por ligamentos revestidos por membrana sinovial. Ocorre movimento relativo entre as superfícies ósseas revestidas pela cartilagem articular, envolvendo a aplicação de tensões normais e de cisalhamento. Esta cartilagem é um tecido sem vascularização, circulação linfática ou enervação. É um composto de células (condrócitos) em uma matriz composta de fibrilas, proteoglicanas mais algumas soluções orgânicas e inorgânicas e tem como funções mecânicas, a transmissão e distribuição das cargas aplicadas na articulação para a estrutura óssea, a manutenção das tensões aplicadas em níveis fisiologicamente toleráveis, a movimentação relativa das superfícies com baixos coeficientes de atrito e a absorção de choque [3].

A membrana sinovial tem como função a secreção de fluido sinovial e a remoção deste e de resíduos do espaço articular [3]. O fluido sinovial por sua vez, fornece os nutrientes para a cartilagem articular e, principalmente, forma um filme lubrificante entre as superfícies articulares.

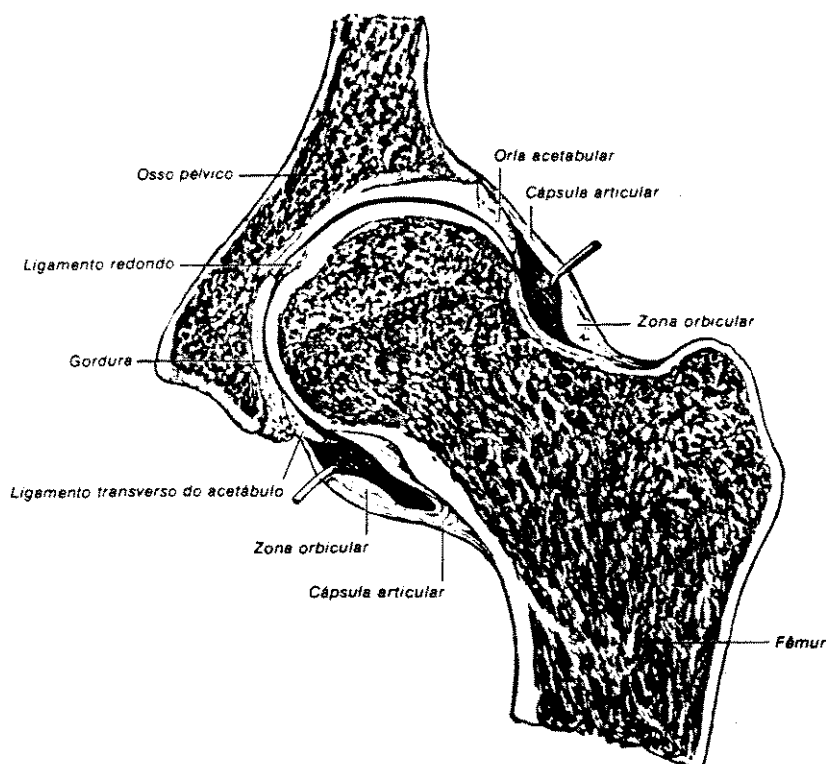


Fig. 1 Secção transversal de articulação do quadril [Ref.1]

Por diferentes causas pode ser necessária a intervenção cirúrgica em uma articulação humana. Em muitos casos a substituição de partes naturais por artificiais torna-se indispensável, sendo então realizada uma artroplastia, podendo ser parcial ou total, dependendo do nível de comprometimento da articulação.

Basicamente uma articulação artificial consiste de um conjunto onde, normalmente, a parte óssea é substituída por um elemento metálico e a cartilagem articular por um elemento polimérico. Com a evolução dos projetos alguns novos materiais foram introduzidos, tais como a utilização de materiais cerâmicos em substituição de algumas superfícies ósseas. Dentre as ligas metálicas testadas temos o aço inoxidável 316L, a liga Cr-Co-Mb e a liga Ti-6Al-4V. Entre os polímeros foram feitas tentativas com o Poli

(tetrafluor etileno) ("TEFLON"), com as poliamidas e com os polietilenos de alta densidade, sendo este último caso o de maior sucesso, devido às melhores características de biocompatibilidade e propriedades mecânicas, notadamente a resistência ao desgaste. Dentre os polietilenos de alta densidade, o de Ultra Alto Peso Molecular é, hoje, praticamente a opção única em polímeros para uso em articulações sinoviais humanas.



Fig. 2 Elementos básicos de uma prótese de quadril. Haste femoral metálica e copo acetabular polimérico

POLÍMEROS

O termo polímero significa várias partes e pode ser entendido como uma molécula composta a partir da repetição de menores e mais simples unidades: os monômeros. Materiais poliméricos são, em sua grande maioria, compostos a base de hidrocarbonetos, formando moléculas de grande porte onde normalmente ainda podem ser ligados outros elementos além de carbono e hidrogênio.

A síntese de polímeros ocorre através das reações químicas de polimerização. Através da formação de ligações covalentes entre os monômeros ocorre a "montagem" da cadeia polimérica. Basicamente as reações de polimerização podem ocorrer por diferentes mecanismos, podendo-se classificar alguns [4]:

- Pelo número de ligações que cada monômero pode formar na reação; funcionalidade
- Pela cinética de reação de polimerização; em cadeia ou por etapas
- Pelo tipo de reação química envolvida na produção de novas ligações; esterificação, amidação, etc
- Pelo número de monômeros envolvidos: homopolímero, copolímero, etc
- Pelo arranjo físico; solução, suspensão, etc

O peso molecular de um polímero é o produto do peso molecular do mero pelo grau de polimerização. As reações de polimerização levam à formação de cadeias poliméricas com diferentes números de unidades repetitivas, ou grau de polimerização. Assim, a exceção de algumas poucas proteínas naturais, todos os polímeros são uma mistura de moléculas de diferentes tamanhos e conseqüentemente de diferentes pesos moleculares (polidispersos). Portanto o peso molecular de um polímero é uma distribuição estatística e pode ser representado por uma típica curva de probabilidade, sendo que esta pode ser larga ou estreita, dependendo de alguns fatores que vão desde a ordem de grandeza dos pesos moleculares até o sistema de catálise da reação de polimerização.

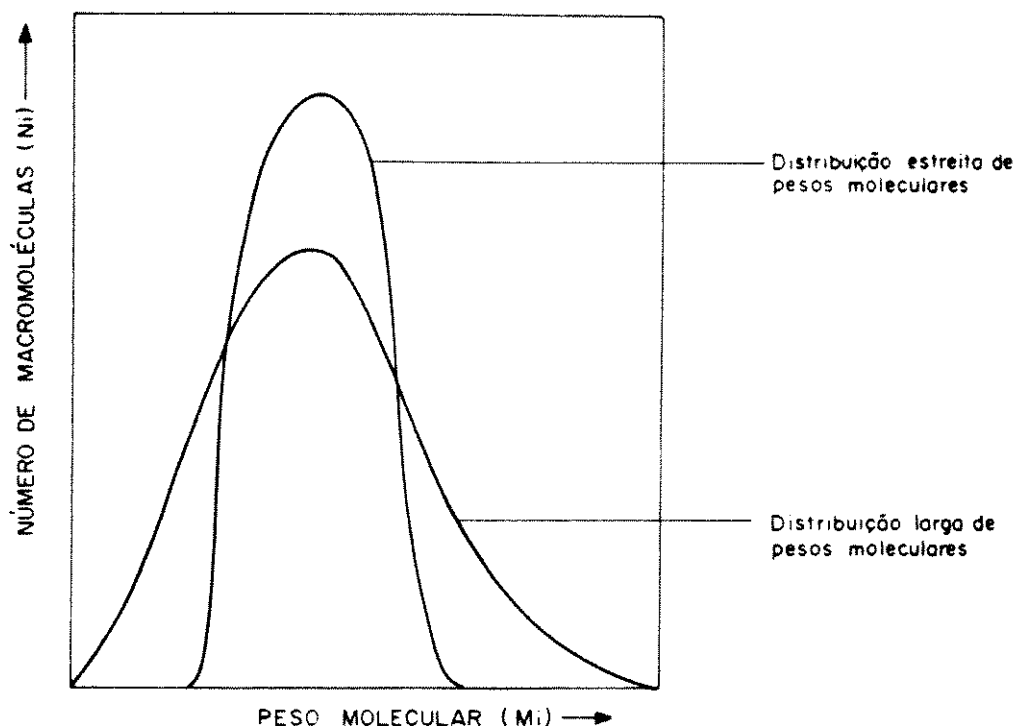


Fig.3 Curvas de distribuição de pesos moleculares. Representação qualitativa de duas distribuições de peso molecular, para amostras de um mesmo polímero [Ref.5]

Quando as cadeias moleculares de um material tem um número de meros superior a cem, podendo chegar a valores muito maiores, são chamadas macromoléculas. Neste caso estas passam a ter um comportamento intrínseco mais relevante do que a influência devido à natureza química do átomos ou dos grupos funcionais que a compõem.[5]

Em função do tamanho da molécula diversas características de morfologia e cinética de cristalização podem ocorrer. O processo de cristalização de polímeros ocorre em duas etapas: nucleação e crescimento. O arranjo molecular, ou a morfologia, é dependente da razão de deposição dos núcleos de cristalização em um tamanho estável e de seu conseqüente crescimento [6].

O tamanho das moléculas influencia o comportamento térmico do polímero como a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de fusão (T_m); as propriedades mecânicas como a fluência e módulo de elasticidade; a cinética de cristalização e a

morfologia cristalina; as relações entre tensão, deformação e tempo ou "equações reológicas de estado" e outras propriedades.

A distribuição de peso molecular e o tamanho médio das moléculas, ou seja o peso molecular médio, mostra-se fundamental no tocante às características do fluxo de polímero fundido [4], pois a viscosidade deste aumenta exponencialmente com o tamanho da cadeia polimérica, determinando assim os tipos possíveis de processamento para o material [4,7]. Para a determinação do peso molecular médio existem hoje diferentes técnicas sendo as principais: Cromatografia de Permeação em Gel (GPC), Osmometria de Membrana, Viscosidade de Soluções Diluídas, Osmometria de Pressão de Vapor e Espalhamento de Luz [4].

OS POLIETILENOS

Os Polietilenos são polímeros da classe das poliolefinas. Estas são hidrocarbnetos alifáticos insaturados contendo uma dupla ligação carbono-carbono por molécula do monômero.

Até a metade da década de 50 todo o polietileno comercialmente disponível era produzido a partir de um único processo de polimerização, que envolvia alta pressão e temperaturas em torno de 150°C a 250°C. O produto apresentava, em média, uma ramificação a cada cem átomos da cadeia. Isto limitava a cristalinidade em torno de 50 % e obtinha-se, assim, densidades na ordem de 0.91 a 0.925 g/cm³. Este tipo de polietileno é hoje conhecido como de baixa densidade [8].

Ainda na década de cinquenta uma série de patentes surgiu para a produção de polietileno de alta densidade, usando catalisadores heterogêneos e a baixas pressões. Através destes processos se obtém o polímero com cadeias com muito poucas ramificações, podendo ser consideradas lineares. Isto implica na cristalinidade em torno de 60 % a 70 % e densidades na ordem de 0.95 g/cm³.

Dentre os polietilenos de alta densidade temos ainda uma vasta gama, comercialmente disponível, de diferentes pesos moleculares, podendo atingir valores de até milhões de g/mol.

O POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (PEUAPM)

O PEUAPM é um polietileno linear de alta densidade e apresenta pesos moleculares a partir de 10E6 g/mol.

É um termoplástico que apresenta uma combinação excepcional de propriedades. Além das características de superfície não aderente, baixo coeficiente de atrito e boa resistência química, também presentes nos polietilenos de peso molecular padrão, o PEUAPM apresenta ainda uma altíssima resistência ao impacto, explicável pelas grandes extensões de áreas amorfas, e a mais alta resistência ao desgaste de todos os polímeros de engenharia [9]. Esta combinação de propriedades é em parte justificada pelo altíssimo peso molecular, pois com o grande tamanho da molécula é difícil o perfeito alinhamento das mesmas e com isso a obtenção de um alto grau de cristalinidade.

O PEUAPM é definido pela ASTM como o polietileno que apresenta uma viscosidade relativa de 2.3 ou mais em uma solução com concentração de 0.05% em decahidronaftaleno (DECALINA) a 135°C. Sendo, então, calculado o peso molecular pela equação de Mark-Houwink-Flory:

$$Mv = K [\eta]^a$$

Onde: Mv = Peso molecular

K e a = Constantes determinadas por espalhamento de luz

η = viscosidade da solução

Por se tratar de um polietileno é um polímero semicristalino, apresentando cristalinidade média em torno de 50 %, porém sob condições de processamento

controladas pode-se obter percentuais maiores. Quando comparado ao polietileno de alta densidade e menor peso molecular (PEAD) apresenta resistência a tração na ruptura, resistência ao fendilhamento e ao fissuramento por tensão ambiental superiores. Por outro lado possui resistência ao escoamento, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade inferiores aos do PEAD [10].

PROCESSAMENTO DO PEUAPM

Existem diversos métodos de processamento de polímeros, estando a maioria deles baseados no escoamento de material fundido. Para que ocorra este escoamento são necessárias que sejam atendidas algumas condições básicas de aspecto reológico, assim alguns dos processos mais comumente empregados para o processamento de polímeros como injeção, extrusão, termoformagem, calandragem, sopro e moldagem por transferência são baseados em características dos materiais que permitem o escoamento de massa fundida sob a aplicação de tensão. Entretanto devido à características de ordem molecular, alguns polímeros não são passíveis de processamento por métodos que envolvam fluxo de material fundido.

O PEUAPM, devido ao seu elevado peso molecular, apresenta uma viscosidade do fundido tão alta que acaba por determinar um índice de fluidez 0 gr/10min. (DIN 53735) [11], estando portanto, entre os polímeros cujo processamento não é factível pelos métodos comumente empregados para termoplásticos, pois seriam necessárias tensões tão altas para o seu escoamento, quando fundido, que inviabilizariam o processo tanto sob o aspecto de equipamento quanto sob o aspecto de degradação do material.

A figura 4 mostra, esquematicamente, o equipamento utilizado na determinação do índice de fluidez. Basicamente seu funcionamento consiste no aquecimento de uma amostra do polímero acima da temperatura de fusão. Aplica-se uma tensão de compressão na massa fundida e mede-se a quantidade de material que escoar pelo orifício.

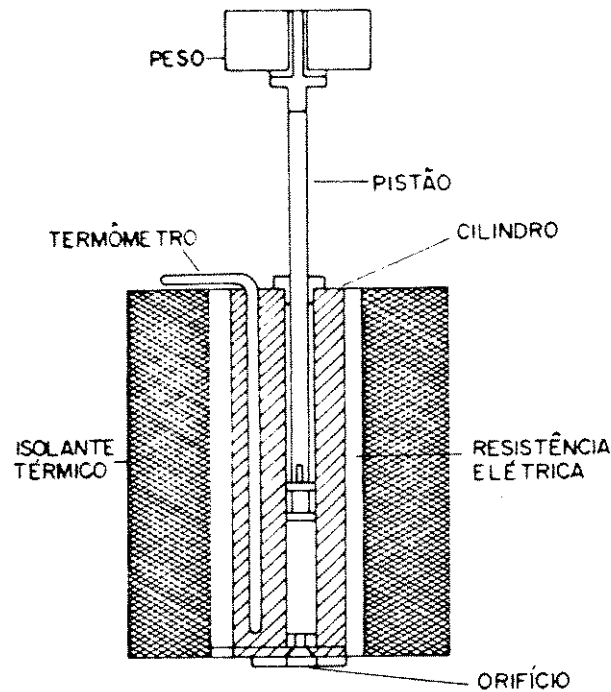


Fig.4 Esquema de um Plastômetro de Extrusão. Aparelho utilizado para a determinação do índice de fluidez [Ref.5]

Devido a este fato foram desenvolvidos ou são estudados diversos processos de moldagem e parâmetros de processamento para o PEUAPM [9-30], sendo a maioria baseados na metalurgia do pó, normalmente utilizado para metais e cerâmicas ou outros polímeros de difícil processamento como o Poli (tetrafluor etileno).

Estando disponível comercialmente sob a forma de pó, o PEUAPM é processado, basicamente, em três fases, independentemente de qual dos tipos de processamento esteja sendo utilizado. São elas:

- 1) Compactação do pó
- 2) Aquecimento para plastificação
- 3) Resfriamento

A maneira como são realizadas estas três etapas cria três diferentes processos que podem acabar gerando diferentes propriedades finais do material moldado.

Em um primeiro caso Fabian [19] discorre sobre o processamento de moldagem por compressão, onde o pó é inicialmente compactado à pressão de 1400 psi (96.55 Kgf/cm²), posteriormente é aquecido sob pressão de 300 a 700 psi (20.68 a 48.27 Kgf/cm²) à temperatura de 400 a 425 F (204.4°C a 218.3°C) até a fusão completa do material, sendo então resfriado sob a mesma pressão inicialmente utilizada de 1400 psi.

Como um segundo caso a partir da variação do processo de moldagem, a literatura [9,11,19] apresenta ainda o processo de RAM EXTRUSION que é a composição das três fases, porém ocorrendo ao mesmo tempo, ou seja: a partir de alimentação contínua de pó o polímero é compactado seguindo para a etapa de fusão e em seguida sendo resfriado. As três etapas ocorrem dentro do mesmo equipamento funcionando como uma extrusora, porém o material é impulsionado por um cilindro hidráulico e aquecido externamente, ao contrário das extrusões convencionais onde o polímero é conduzido por uma rosca e o aquecimento é gerado, predominantemente, pelo cisalhamento imposto pelo movimento da rosca.

A terceira forma de processamento apresentada [13,16-18,24,28], baseia-se em metalurgia do pó de maneira idêntica à aplicada para metais e cerâmicas.

Esta técnica tem sido utilizada para polímero de difícil processamento mostrando-se bastante adequada para o PEUAPM. Mais uma vez o processo pode ser dividido em três etapas:

- 1) Compactação à frio
- 2) Sinterização em forno com atmosfera controlada
- 3) Resfriamento livre de pressão, em atmosfera controlada

Outros métodos de moldagem do PEUAPM são baseados em um processamento inicial por alguma das três técnicas apresentadas e, numa segunda fase é realizada alguma deformação no moldado [20,21,25-27], ou apresentando as mesmas características básicas dos três processos, mas com variações nos métodos de aquecimento [12].

A literatura em processamento de polímeros não apresenta uma terminologia de consenso para a denominação dos diferentes processos de fabricação de moldados a partir da tecnologia do pó, quando comparados o primeiro e o terceiro caso. Halldin [18] descreve o processamento do pó (powder processing) como: *"qualquer técnica de fabricação que utilize um pó ou material em partícula como forma inicial da matéria-prima. O objetivo do processamento do pó (powder processing) é causar uma consolidação ou agrupamento para uma forma desejada obtendo como consequência um aumento nos níveis de densidade e de resistência. Cerâmicas cristalina e amorfa são fabricadas via processamento de pó, bem como metais em "metalurgia do pó". O uso deste último termo é muito menos desagradável do que o mais usual - fabricação de polímeros pela tecnologia da metalurgia do pó -. Moldagem por compressão e tecnologia de recobrimento por látex e pó são também exemplos de processamento do pó, mas não serão considerados processamento do pó convencionais"*. Zachariades [14] se refere a processamento do pó, como a tecnologia de processamento de metais e cerâmicas, entretanto para a confecção de seus corpos de prova o autor descreve um processamento idêntico ao primeiro tipo descrito neste trabalho ou seja: moldagem por compressão.

Apesar de se utilizarem dos mesmos princípios a Moldagem por compressão e a Metalurgia do pó apresentam diferenças marcantes. Em ambos os casos o ciclo de processamento do material tem como objetivo promover a diminuição da energia superficial das partículas, porém através da aplicação de energia por meios predominantemente diferentes. Na moldagem por compressão está envolvido um nível menor de pressão para a compactação e plastificação do pó. A compactação inicial tem como objetivo a degaseificação da massa de pó na cavidade da matriz e tem como consequência o aumento da densidade [11], já na metalurgia do pó a compactação inicial objetiva, predominantemente, o aumento da densidade e a diminuição da energia superficial das partículas [18]. Esta diferença na fase de compactação envolve diferentes

ordens de grandeza nas pressões aplicadas. Para a moldagem por compressão estão envolvidas pressões na ordem de, no máximo, centenas de Kgf/cm², enquanto na metalurgia do pó são aplicadas pressões de alguns milhares de Kgf/cm².

Nesta etapa a morfologia das partículas tem grande importância, pois determinará a densidade do compactado cru (densidade em verde) e esta por sua vez tem influência marcante nas propriedades mecânicas finais do moldado. Halldin [18] em estudo de diferentes marcas de PEUAPM determina a curva de variação da densidade em verde em função das pressões aplicadas.

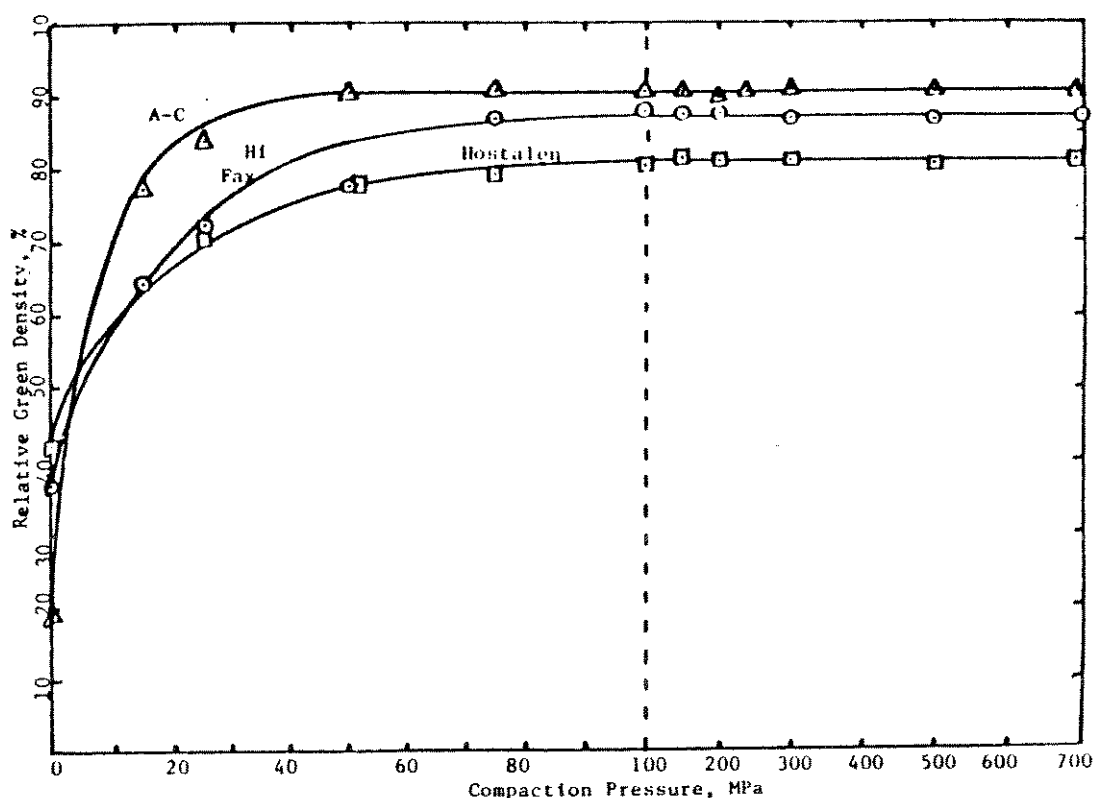


Fig. 5 Variação das densidades em verde em função das pressões de compactação utilizadas [Ref.18]

A fase seguinte à compactação envolve o aquecimento dos compactados, porém de maneiras diferenciadas entre os processos. Na moldagem por compressão o material é compactado e aquecido na própria matriz. O aquecimento é feito sob pressão porém em menor grau que na primeira fase: em torno de 20 Kgf/cm². A temperatura é elevada até

níveis muito superiores à temperatura de fusão do polímero, e permanece em uma condição estável até a fusão completa da massa polimérica na matriz. Já na metalurgia do pó o compactado é desmoldado e levado ao aquecimento livre até temperaturas próximas às de fusão. A fase de aquecimento na metalurgia do pó tem como objetivo promover o coalescimento entre as partículas [18], fazendo assim com que ocorra uma "solda" entre estas e forme-se um corpo único. Na moldagem por compressão o ciclo de aquecimento tem como objetivo promover a fusão completa das partículas de polímero e o entrelaçamento das moléculas como um todo, e não só nas superfícies, como na metalurgia do pó.

Apesar da fusão, devido à viscosidade extremamente elevada, o coalescimento entre as partículas é pequeno [14,29]. Assim as propriedades finais, quanto à características mecânicas, obtidas no processo de metalurgia do pó são inferiores às obtidas na moldagem por compressão [18].

A temperatura de fusão da fase cristalina do PEUAPM situa-se em média entre 130°C e 145°C, porém utiliza-se para o processamento temperaturas acima de 200°C, no mínimo, pois as propriedades mecânicas finais são fortemente dependentes do grau de fusão [14,29].

A etapa de resfriamento também é realizada de forma diferenciada entre os dois processos. Na metalurgia do pó o corpo moldado é resfriado sem aplicação de pressão ou seja livremente. Na moldagem por compressão a massa fundida de polímero é resfriada sob a pressão utilizada na primeira fase.

Estas diferenças na realização da moldagem do polímero implicam no uso de diferentes equipamentos, para a fabricação de peças de mesmo tamanho. Para a moldagem por compressão é necessária a utilização de prensas de menor capacidade em relação às utilizadas na metalurgia do pó. As matrizes de compactação são também diferenciadas, sendo mais reforçadas no segundo caso. O ciclo de aquecimento é realizado em condições totalmente diferentes para ambos os processos. Na moldagem por compressão o material é

aquecido sem ser desmoldado, normalmente por um sistema de aquecimento próprio da matriz e da prensa. Já na metalurgia do pó o material é submetido ao aquecimento livre, portanto desmoldado. É preciso que o aquecimento seja realizado na ausência de oxigênio para evitar a degradação por oxidação do polímero, utilizando-se assim, atmosfera de nitrogênio.

Para o resfriamento na moldagem por compressão utiliza-se novamente a prensa, enquanto na metalurgia do pó o material é resfriado sem aplicação de pressão e, ainda, em presença de nitrogênio.

Não só no aspecto de equipamentos necessários se diferenciam os processamentos, mas principalmente nas características físicas e mecânicas do material moldado. Assim o produto da metalurgia do pó apresenta densidades menores que às apresentadas no moldado pela moldagem por compressão [18]. Sendo o primeiro um tipo de processamento muito mais sensível às características do polímero nascente que o segundo, pois a morfologia das partículas e a viscosidade do fundido acabam tendo maior influência, uma vez que na metalurgia do pó o entrelaçamento das moléculas de polímero é decorrência da densidade inicialmente obtida na fase de compactação e da sinterização livre. Por outro lado na moldagem por compressão o material é fundido na íntegra acarretando uma mobilidade maior das moléculas, o que explica a maior densidade obtida. Ocorrem também diferenças em tempo de processamento, sendo menores para a metalurgia do pó, o que se refletirá no custo final do produto moldado.

Assim, a escolha do tipo de processamento deve considerar a demanda do material, a disponibilidade de equipamento e o uso final do material, principalmente do grau de comprometimento das propriedades mecânicas obtidas.

DESGASTE DO PEUAPM

Por muitos séculos a teoria dos processos de fricção esteve muitos passos atrás do conhecimento prático, na determinação de pares de materiais e lubrificantes para aplicações em deslizamento. Porém ao longo de poucos anos este quadro já se alterou [31], através do estudo da Tribologia, que é definida como: *"a ciência ou a tecnologia das superfícies que se interagem em movimento relativo"* [32]

O desgaste do PEUAPM em componentes protéticos tem sido objeto de estudo interdisciplinar já a alguns anos. Os mecanismos que regem o desgaste de superfícies poliméricas atritando contra superfícies metálicas ou cerâmicas tem sido utilizados no estudo dos fenômenos de desgaste existentes em articulações artificiais. O próprio critério de escolha do Polietileno para uso em próteses foi feito a partir de resultados de ensaios de desgaste e coeficiente de atrito, contra ligas metálicas normalmente utilizadas para este caso.

As forças envolvidas durante todos os ciclos da deambulação, bem como as distribuições de tensão ao longo do fêmur estão determinadas para uma série de condições [33]. As distribuições de tensão na epífise femoral e na cavidade acetabular ainda permanecem em níveis de hipótese. E o conhecimento das tensões aplicadas nestas regiões é de fundamental importância para o estudo do comportamento tribológico da mesma.

A realização de ensaios de desgaste em condições que simulem uma articulação sinovial tem se apresentado como um problema técnico de difícil solução, o que explica-se pelo desconhecimento das condições exatas em que trabalha tal articulação. A anatomia da articulação sinovial do quadril, conforme já exposto, é bastante conhecida, porém sob aspecto de biomecânica ainda restam importantes dúvidas, tais como as distribuições de tensão nas superfícies de contato, pois não se conhece exatamente a área de contato entre as mesmas [34,35].

Em parte, o desconhecimento ou a imprecisão quanto aos valores destas áreas justifica-se pelo comportamento mecânico dos materiais envolvidos na articulação. Tanto

no caso de próteses quanto na articulação natural, os materiais envolvidos, polímero e cartilagem hialina respectivamente, apresentam comportamento viscoelástico [15,23,30,36,37]. Assim, para a aplicação de tensão corresponde uma deformação em parte recuperável e em parte permanente, o que gera uma constante alteração da configuração das superfícies de contato.

A realização de ensaios de desgaste de fricção de duas superfícies exige que se estabeleça as condições de velocidade, tensão de compressão e lubrificação envolvidos. As condições de tensão (P) e velocidade (V) irão determinar o produto PV, que está relacionada a vida útil de um dado material para as condições de lubrificação envolvidas[38].

Os possíveis mecanismos de desgaste existentes em uma articulação artificial são pesquisados sempre por meio do estudo de elementos, que estiveram em uso e foram posteriormente recuperados quando da substituição da prótese por motivos diversos. O estudo das mudanças estruturais dos materiais é realizado [39,40] bem como o estudo das condições das superfícies de desgaste [41-45].

A literatura [38,44,46-53] indica alguns possíveis mecanismos de desgaste que ocorrem em uma articulação artificial, normalmente baseada em ensaios *in vitro*, procurando simular as condições existentes em uma articulação do tipo sinovial de quadril ou de joelho. Porém devido às imprecisões relacionadas ao desconhecimento das distribuições de tensão nas superfícies de contato, muitas questões tem permanecido sem respostas, no tocante aos mecanismos de desgaste existentes. Nusbaum et alli [53] discorrem dentre os mecanismos de desgaste propostos pela literatura os aplicáveis ao PEUAPM em articulações artificiais, baseado em propriedades características de desgaste de polímeros contra superfícies metálicas:

- 1) Desgaste adesivo
- 2) Desgaste abrasivo
- 3) Abrasão por fadiga

- 4) Desgaste por fadiga
- 5) Desgaste por fratura frágil
- 6) Formação de rolo
- 7) Desgaste por penetração
- 8) Desgaste pela teoria da delaminação

A simulação das condições existentes em uma prótese de articulação sinovial, para a execução de ensaios de desgaste, envolve o conhecimento das distribuições de tensão, velocidades relativas entre as superfícies e o regime de lubrificação. As distribuições de tensão conforme foi descrito, ainda se apresentam como uma questão sem resposta exata, posto que não existe consenso quanto à valores de tensão de compressão atuantes na articulação do quadril.

Além das imprecisões quanto as áreas de contato existem, ainda, as variações em carregamentos durante um ciclo de deambulação. Desta forma só se define uma faixa de tensões existentes. McKellop et alli [49] definem tensões entre 3.45 MPa a 6.90 MPa. Shen et alli [54] estima que as tensões podem atingir picos de 6.90 MPa a até 10.35 MPa. Os mesmos autores em outro trabalho [55] concluem, em função das incertezas nas condições existentes em uma articulação artificial, que não há uma maneira exatamente correta para a realização de ensaios de desgaste.

De forma análoga à tensão, também as velocidades existentes não estão determinadas quanto a valores exatos. Existem faixas de velocidades relativas entre as superfícies da articulação, pois ocorre variação em módulo e sentido durante um ciclo de deambulação. Para a realização de ensaios alguns autores adotam valores médios de 240 mm/seg. [44,52]. Rostoker [56] utiliza velocidade de 1150 mm/seg., estando, ainda, indicado na literatura valores de 3 mm/seg. até 10000 mm/seg. [47,49,50,55].

As condições de pressão e velocidade em ensaios de desgaste determinam o produto PV e este por sua vez tem valores limites distintos para ensaios com e sem a

presença de lubrificantes. Para o caso de ensaios de desgaste em simulação de próteses de articulação sinovial podem, ou não, ser utilizados fluidos lubrificantes.

Após realizada a artroplastia, a membrana sinovial não segrega o fluido sinovial na composição normal [40]. Assim está, então, inserido mais uma componente de incerteza quanto às condições de trabalho de uma articulação artificial.

EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS

Para que seja possível a realização de qualquer estudo de características de fabricação de um produto em questão ao desempenho em uso é preciso que possa-se variar as condições de produção. A partir disto pode-se, então, correlacionar diferentes variáveis ao comportamento em estudo.

O processamento do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, como foi visto, é realizado, independentemente do método, através do uso de prensagem e aquecimento.

O uso em estudo é para articulações artificiais de quadril. Desejando-se desenvolver um equipamento que viabilize a determinação do comportamento do polímero para as condições semelhantes às deste tipo de articulação.

A partir do conhecimento das condições de processamento e das possíveis condições existentes em uma articulação do tipo sinovial de quadril, foram projetados e construídos os equipamentos que compõem a infra-estrutura básica para a pesquisa em biomateriais, particularmente para polímeros em próteses.

DESENVOLVIMENTO DE UMA PRENSA PARA MOLDAGEM DO PEUAPM

O projeto de qualquer equipamento deve ser elaborado em função do uso específico para o mesmo. Neste caso, o projeto é o de um equipamento que viabilize o processamento de um termoplástico, cujo comportamento é bastante diferenciado da média de outros polímeros. Baseado em parâmetros demonstrados na literatura (conforme mostrado no cap. anterior), foi projetada uma prensa que atendesse à exigências de processamento e que permita variações controladas destes parâmetros, possibilitando a moldagem do polímero em diferentes condições desejadas.

Qualquer um dos diferentes processamentos, indicados na literatura, para o PEUAPM requer pelo menos um ciclo de prensagem, com manutenção de força. A prensa a ser utilizada deve permitir a repetibilidade de velocidade e ser capaz de manter o mesmo nível de força por um intervalo de tempo indeterminado e para qualquer posição do

punção em função da contração do material, seja durante a fase de degaseificação-compactação do processo de metalurgia do pó, seja durante a degaseificação ou o resfriamento sob pressão no processo de moldagem por compressão.

Para o caso deste trabalho os níveis de força necessários são relativamente baixos (até 600 Kgf), uma vez que objetiva-se a moldagem de corpos de prova (CDP) de pequenas dimensões, para posterior ensaios de desgaste.

SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

Para baixas cargas e com a exigência de manutenção de força independentemente do tempo de aplicação e da posição do punção, recai-se em dois possíveis sistemas de prensa: hidráulico ou pneumático. Em ambos os casos são necessários recursos que permitam o controle automático da pressão de maneira a garantir que esta sempre permaneça igual ao longo de cada fase do processo, pois em qualquer tipo de processamento, dentre os expostos neste trabalho, ocorre uma variação de densidade gradual e lenta em no mínimo uma etapa onde é utilizada a prensagem.

Para sistemas hidráulicos a manutenção de pressão em linha pode ser obtida ou pelo uso de um conjunto pressostato-válvula direcional ou através de um acumulador de pressão. No primeiro caso o pressostato tem a função de monitorar a pressão e a partir da queda da mesma, seja devido à movimentação do punção gerada pela variação da densidade do material em processamento, ou por qualquer escape de pressão inerente a um sistema hidráulico, acionar a válvula direcional para a reposição da pressão dentro da faixa desejada. O acumulador de pressão exerce a mesma função do conjunto pressostato-válvula direcional, porém por meio diferente. O acumulador é um dispositivo, como o próprio nome identifica, no qual é acumulado fluido hidráulico a pressão maior que a máxima de trabalho da linha de prensa. Com a queda de pressão na linha de atuação da prensa, ocorre a abertura da válvula equalizadora do acumulador até a pressão atingir os níveis pré-estabelecidos. Como se pode deduzir a manutenção de pressão em uma prensa

hidráulica envolve no mínimo a adoção de um equipamento adicional ao seu funcionamento padrão, ou seja a prensagem simples. O sistema pneumático tem como requisito básico, de maneira idêntica ao sistema hidráulico de prensagem simples, uma válvula direcional e uma válvula de segurança controladora de pressão. A manutenção de pressão ao longo de qualquer etapa do processo é muito mais facilmente assegurada do que em sistemas hidráulicos, para este caso onde estão envolvidas baixas cargas. Isto se deve ao fato de que o próprio princípio de um sistema pneumático se baseia na acumulação de pressão em um ponto qualquer da linha de ar comprimido. Assim, um sistema pneumático é, em seu princípio básico, muito próximo de uma prensa hidráulica com a adoção de um sistema de acumulador de pressão. Para casos, como o deste trabalho, onde são exigidas forças de prensagem baixas, o sistema pneumático aparece como uma boa opção.

Além da diferenciação em termos de facilidade técnica, a adoção de sistema pneumático acarreta em menor custo devido à disponibilidade de ar comprimido. Já um sistema hidráulico exige a construção de uma unidade hidráulica, a custo relativamente alto.

A velocidade de avanço e retorno do punção, para o sistema pneumático é controlada por válvulas reguladoras de vazão instaladas na entrada e na saída do cilindro atuador.

O projeto desta prensa foi feito especificamente para permitir a confecção de corpos de prova de PEUAPM para ensaios de desgaste.

O conjunto pneumático é composto por um cilindro de dupla ação, marca Festo tipo DNB 125 (1), com diâmetro interno 125 mm. São montadas na entrada e na saída válvulas reguladoras de fluxo com retenção paralela e retorno livre, para permitir o controle de velocidades de avanço e retorno (2 & 3). O circuito é comandado por uma válvula direcional de quatro vias com duas posições (4). Utiliza-se ainda uma unidade de

conservação com filtro, válvula reguladora de pressão, lubrificador, separador de água com dreno manual e manômetro (7).

A variação de forças de trabalho é feita pela regulagem da pressão na válvula reguladora. O controle da pressão é exercido através de dois manômetros: um é parte integrante da válvula reguladora de pressão e o outro é de alta precisão, marca Willy com fundo de escala em 6.0 Bar (6), ficando instalado na linha de avanço do cilindro. A linha de ar comprimido é abastecida por um compressor como pressão máxima de trabalho 12 Kgf/cm² (8), o que limitaria a prensa pneumática a uma força limite de aproximadamente 980 Kgf, sendo esta além do necessário para o processamento dos corpos de prova para os ensaios de desgaste. Na saída de ar foi instalado um silenciador (5), funcionando tanto para avanço quanto para retorno. A figura abaixo mostra esquematicamente o circuito pneumático utilizado.

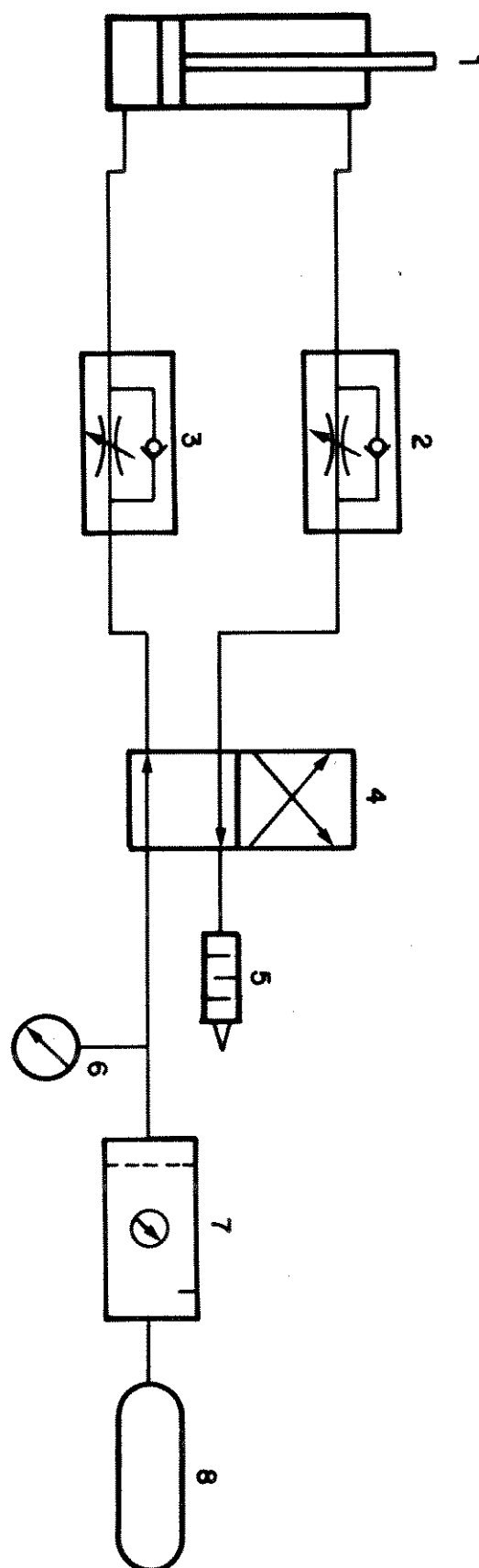


Fig. 6 Circuito pneumático para movimentação de prensa

ESTRUTURA

A estrutura é formada por um conjunto que é basicamente composto por três mesas: inferior, móvel e superior, sendo a móvel guiada em duas colunas. A mesa inferior é uma placa onde são fixadas por interferência as colunas-guia, parafusada a matriz de compactação e é montado o pino extrator. A mesa móvel é, uma placa de iguais dimensões às da inferior, onde é fixado o punção da matriz na face inferior, e na face superior é fixada uma placa intermediária que por sua vez é rosqueada na haste do êmbolo pneumático. A mesa superior é a placa na qual é fixada o cilindro pneumático por meio de tirantes e esta, por sua vez, é fixada nas colunas-guia.

A mesa móvel foi feita de maneira a ter ajuste deslizante com as colunas-guia. Estas por sua vez são barras de aço 1045 torneadas e retificadas em retífica centerless. Assim obteve-se folga entre furo da mesa e coluna inferiores a 5 centésimos de mm. Abaixo é apresentada a foto do conjunto e o desenho de montagem é mostrado no Apêndice A, juntamente com a lista dos componentes.

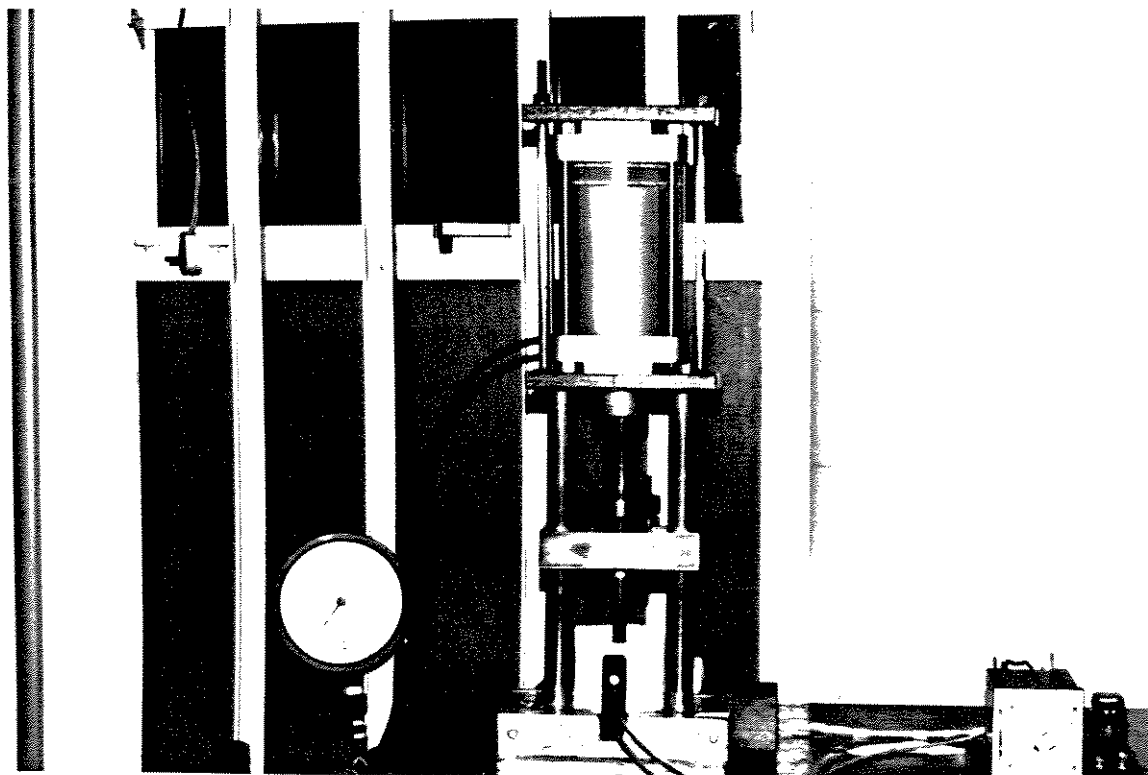


Fig. 7 Prensa para processamento de PEUAPM desenvolvida

MATRIZ DE MOLDAGEM

O projeto da matriz para moldagem foi feito objetivando-se a confecção de corpos de prova (CDP) para posteriores ensaios de desgaste. A geometria adotada para os CDPs de ensaios de desgaste é a de um cilindro com diâmetro de 15 mm, com comprimento de 25 mm. A matriz de moldagem foi dimensionada de maneira a permitir que sejam obtidos os cilindros com os 15 mm de diâmetros e com 35 mm de comprimento. Desta forma o ajuste do moldado à medida de teste é obtido apenas com o ajuste no comprimento. O diâmetro interno da matriz tem 1 décimo de mm a mais que a medida final desejada, devido à contração prevista do polímero no processamento.

A matriz de moldagem é, basicamente, um tubo de aço inoxidável onde é despejado o polímero em pó, para compactação-plastificação. O fundo é uma pastilha móvel, também em aço inox, com folga em relação às paredes da matriz de 3 centésimos de mm, o que não permite o escape de massa polimérica, para baixo, quando em compressão.

A extração da peça moldada é feita com o auxílio do pino extrator. Este, por sua vez, é um pino roscado trabalhando dentro de um tubo o qual é fixado na base da matriz por parafusos, e encaixado na base inferior da estrutura da prensa. A figura abaixo mostra o conjunto montado.

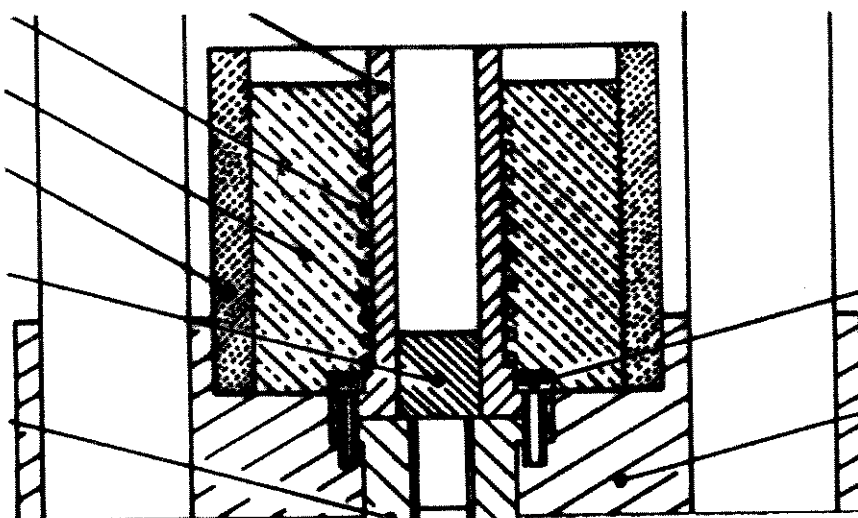


Fig. 8 Conjunto Matriz de moldagem + base inferior

SISTEMA DE AQUECIMENTO E ISOLAMENTO TÉRMICO

O sistema de aquecimento é constituído por duas resistências ligadas em série, com potência total de 250 W. As resistências são feitas de fio "KANTAL" envolvido por missangas de porcelana para isolamento, sendo o conjunto das resistências enrolado na matriz.

Para o controle da temperatura utiliza-se um pirômetro Pextroterm e um indicador digital Pirotec. O monitoramento da temperatura é feita através de dois termopares tipo K, ligados no pirômetro e no indicador digital.

O isolamento térmico é obtido pelo uso de um tubo de fibra mineral refratária envolvendo o conjunto matriz mais resistências mais massa refratária de Barbutina, colocada com o objetivo de aumentar a massa térmica do conjunto.

PROJETO DO DISPOSITIVO DE ENSAIO DE DESGASTE

Quando da realização de um experimento deve-se considerar a repetibilidade dos resultados. Assim, é importante que estes sejam realizados mais de uma vez, para que se obtenha um valor médio dos mesmos. Porém, para casos cujos experimentos despendam muito tempo, a realização dos mesmos repetidas vezes torna-se problemática ou, em alguns casos, inviável.

Ensaio de desgaste, visando simular condições de uso de uma prótese ortopédica, tem como objetivo, entre outros, permitir o estudo dos mecanismos de desgaste que eventualmente ocorram durante o funcionamento normal dos componentes protéticos. Assim, tais ensaios não podem ser realizados sob condições extremas. Por outro lado deseja-se estudar o comportamento de componentes, cuja duração situa-se na escala de anos. A questão é, então, realizar ensaios que demonstrem o comportamento dos componentes, ou dos materiais, de forma confiável, porém em intervalos de tempo não tão longos, quanto os de uso real.

Diversas configurações de dispositivos são apresentadas na literatura [46-56]. As idéias, entretanto, são sempre muito próximas. Os dispositivos são baseados no conceito de movimento relativo entre superfícies, podendo ser estes alternativos ou contínuos.

O projeto do dispositivo de ensaio de desgaste foi feito visando a simulação de uma articulação do tipo sinovial, para condições de funcionamento de uma prótese articular. O objetivo é permitir que sejam feitos ensaios em simulação a qualquer uma das articulações sinoviais do corpo humano. Assim um critério básico no dimensionamento do dispositivo é a capacidade para a simulação da articulação mais solicitada, em termos de esforços mecânicos, ou seja: a do quadril.

A idéia é simular o movimento relativo existente entre as superfícies de contato de uma articulação, simulando, também, as condições de carregamento mecânico e de lubrificação.

Dentre os vários projetos de dispositivos apresentados na literatura pesquisada, apenas uma concepção permite a obtenção de resultados médios mediante a realização de um ensaio. A configuração TRI-PIN-ON-DISC permite a obtenção de resultado mediante a média de três corpos de prova, em um mesmo ensaio. Brown et alli [44] e Jones et alli [51] utilizaram dispositivos neste conceito obtendo resultados, quanto aos mecanismos de desgaste, bastante próximos dos previstos pelos estudos dos componentes protéticos reais, recuperados de uso normal.

Decidiu-se pela execução de um projeto do dispositivo na configuração TRI-PIN-ON-DISC. A decisão foi baseada na vantagem do resultado médio para um ensaio e nos resultados demonstrados na literatura, tanto para esta configuração quanto para as outras.

O dispositivo construído pode ser subdividido, para efeito de descrição, em duas partes: Sistema de ensaio e carregamento e Sistema motor. O desenho de montagem completo e a lista dos componentes encontra-se no apêndice B.

SISTEMA DE ENSAIO E CARREGAMENTO

O conceito do dispositivo de ensaio de desgaste tipo TRI-PIN-ON-DISC baseia-se na simulação das condições médias existentes em uma articulação. Para a simulação de uma articulação de quadril são utilizadas a velocidade média e tensão de compressão média, encontradas em um ciclo de deambulação.

O projeto do dispositivo prevê, ainda, a possibilidade da execução de ensaios em presença de fluido lubrificante, que pode ser continuamente infundido, sendo então constantemente renovado, ou ser utilizado sem renovação ao longo do teste. Para garantir a durabilidade e, principalmente, a não contaminação dos materiais em teste, o dispositivo é feito em aço inoxidável 304 e em vidro, nas partes que eventualmente irão em contato com qualquer tipo de fluido lubrificante.

O equipamento consiste de um prato giratório em cima do qual é fixado um dos corpos de prova. Para o caso do ensaio do PEUAPM são discos de aço inoxidável 316L (no apêndice C podem ser vistas as fotos do exame metalográfico feito nestes discos), que tem como objetivo simular a parte metálica de uma prótese. Estes são fixados por encaixe em pinos que, por sua vez, estão travados ao prato.

Em um conjunto superior são fixados os três corpos de prova de PEUAPM. Estes são cilindros de diâmetro 15 mm e, para este trabalho, 25 mm de comprimento. A fixação destes cilindros é feita através de encaixe em furos usinados na placa superior. Estes furos de encaixe estão dispostos a cada 120 graus e em um raio de 45 mm.

A força normal sobre os cilindros de polímero é gerada por um sistema de alavanca e pesos. Assim com a variação dos pesos pode-se variar as tensões de compressão na superfície de contato de desgaste. As figuras 9 & 10 mostram parte do desenho de montagem do dispositivo completo detalhando o sistema de ensaio e carregamento e a foto do conjunto.

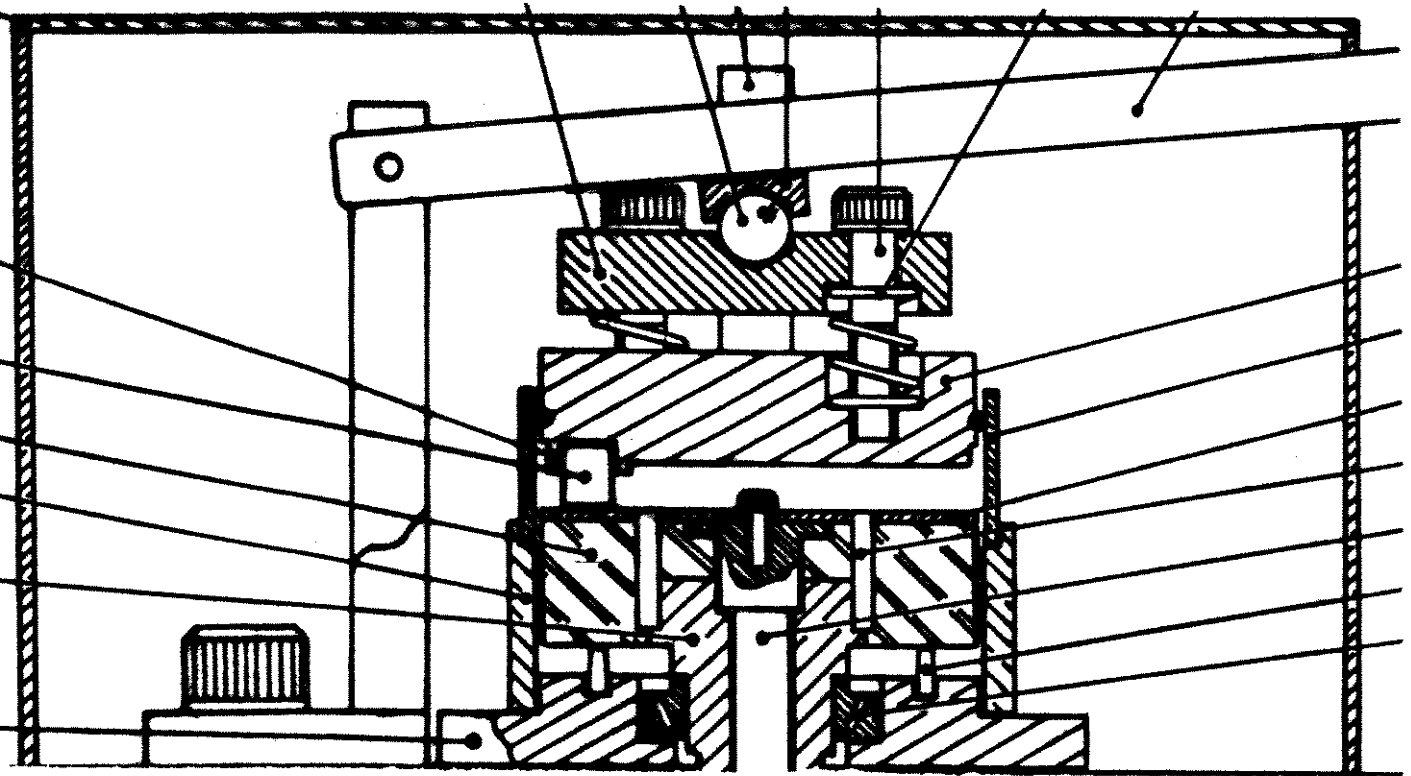


Fig. 9 Vista em corte lateral do Sistema de Ensaio e Carregamento

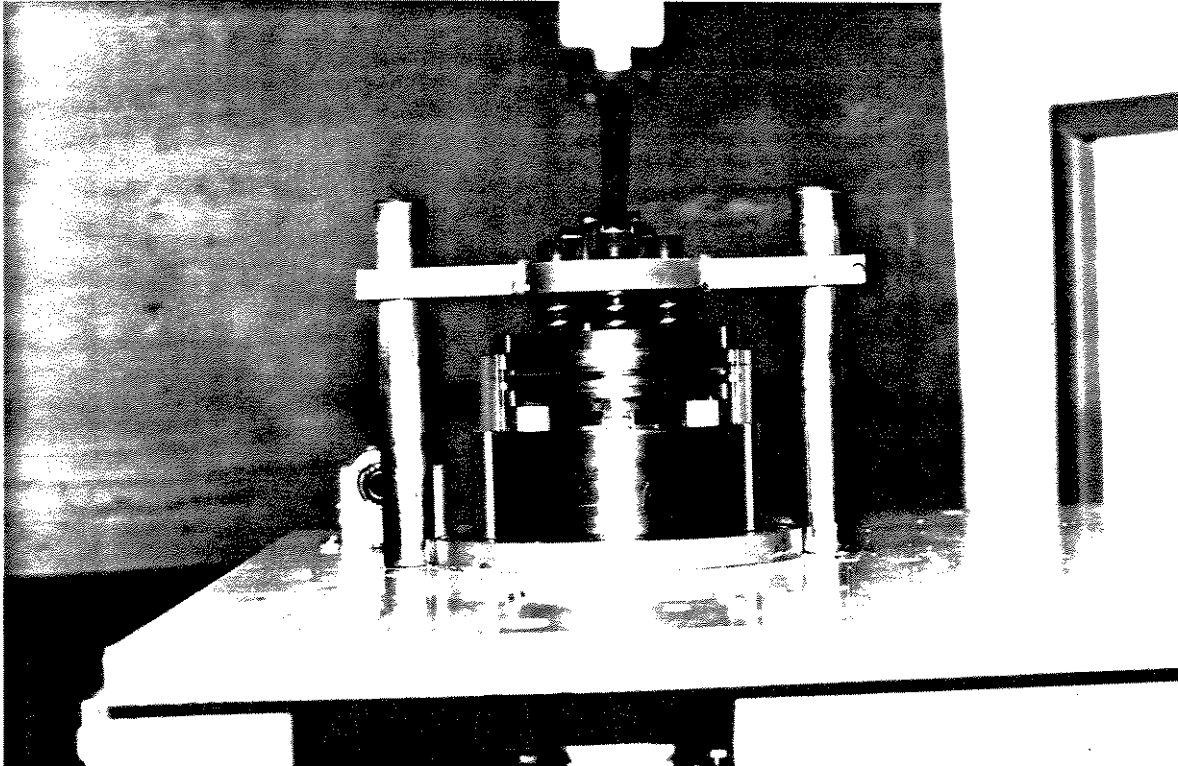


Fig. 10 Foto do Sistema de Ensaio e Carregamento e do dispositivo completo

Por utilizar um sistema de alavanca foi preciso adotar o uso de uma esfera de aço em uma cavidade para garantir a aplicação de força normal, independentemente do ângulo assumido pela alavanca, em relação ao dispositivo.

Para o caso de ensaios de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, as medidas de desgaste serão feitas pela determinação da perda em peso dos corpos de prova.

SISTEMA MOTOR

Conforme já exposto anteriormente, não há na literatura a definição das condições exatas para a realização de ensaios de desgaste, em simulação à uma articulação de quadri.

Sendo o raio médio de posicionamento dos pinos de 45 mm, adotou-se um regime de rotação de 118 rpm o que resulta em velocidade relativa entre pinos e disco de 556 mm/seg.. Este valor de velocidade se encontra na mesma ordem de grandeza dos valores médios apresentados na literatura, porém um pouco acima da média, de maneira a permitir a simulação das condições reais em tempos mais curtos.

A movimentação do conjunto é gerada por um motor de indução trifásico de 3/4 de hp. com rotação nominal de 1720 rpm. O motor é acoplado a um sistema de redutor misto de correias e engrenagens, com redução total de 14.5:1. Abaixo é apresentada a foto do conjunto motor-redutor.

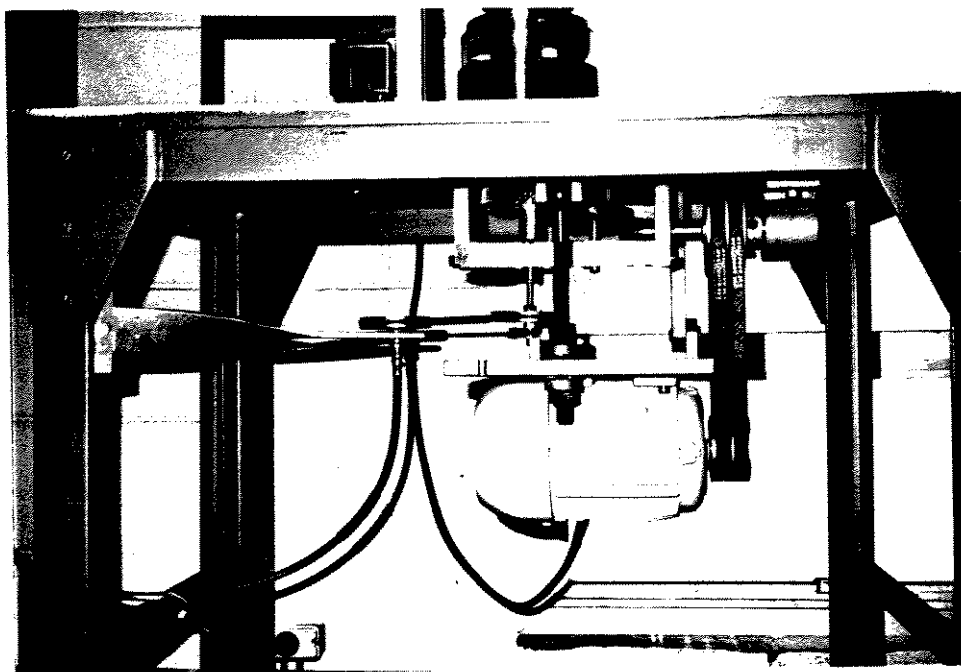


Fig. 11 Sistema motor-reductor do dispositivo TRI-PIN-ON-DISC

CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

MATERIAL

O PEUAPM é fornecido pelos fabricantes da matéria prima sob a forma de um pó fino e com a possibilidade da opção de diferentes pesos moleculares. Para este trabalho foram obtidas amostras de dois fabricantes, um nacional de fabricação da POLIALDEN Petroquímica S.A. e outro importado de fabricação da HOECHST Plastics AG, de origem alemã. O material nacional tem como marca comercial UTEC 3540 e o alemão GUR 413.

Por se tratar de polímero sintético, apresentam polidispersidade, o que implica em uma faixa de pesos moleculares para ambos os materiais. Segundo informação dos fabricantes são encontrados pesos moleculares na média de $4.0 \cdot 10^6$ g/mol para o UTEC 3540 e $5.6 \cdot 10^6$ g/mol para o GUR 413. Ainda segundo os fabricantes os materiais apresentam ponto de fusão em 133°C e não contém nenhum aditivo, tais como antioxidante ou outros estabilizantes.

A determinação de pesos moleculares para o caso destes polímeros foi feita, segundo informações dos fabricantes, pela medida de viscosidade. Para casos de peso molecular muito elevados, como os de PEUAPM, os valores obtidos apresentam uma razoável imprecisão, porém a diferença entre os pesos moleculares, dos dois materiais, apresentada um valor significativo, podendo gerar diferenças no comportamento dos polímeros.

METODOLOGIA

Baseado nas características dos diferentes processamentos aplicáveis ao PEUAPM, foram efetuados testes para caracterizar o comportamento do polímero em função de parâmetros, os quais possa-se correlacionar às diferentes fases dos processos. Foram, então, realizadas caracterizações dos diferentes polímeros em três aspectos: Determinação do Tamanho Médio das Partículas, Estudo da Morfologia e Topografia das Partículas e Estudo do Comportamento Térmico.

Os dois primeiros aspectos estão relacionados à características do polímero nascente, ou seja do material como fornecido pelos fabricantes. São características de forte influência na fase inicial de processamento, compactação a frio; tanto para a Moldagem por Compressão quanto para a Metalurgia do Pó. O terceiro aspecto relaciona-se às outras duas fase de processamento, aquecimento até a fusão e resfriamento.

DETERMINAÇÃO DO TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS

A princípio tentou-se determinar a distribuição do tamanho de partículas através do uso de um Sedígrafo. Sendo a densidade do PEUAPM na ordem de 0.94 g/cm³, foi necessário a utilização de álcool etílico, de densidade 0.90 g/cm³, como meio de transporte das partículas, pois em água ocorreria a flutuação das mesmas. A fim de se obter a separação entre as partículas utilizou-se desintegração com ultra-som no banho, porém devido ao tamanho das mesmas, mesmo separadamente, a utilização do Sedígrafo não foi possível, ocorrendo entupimento dos dutos do equipamento.

Devido à impossibilidade da utilização do Sedígrafo, a determinação do tamanho médio das partículas foi feita através do Peneiramento Refinado. Foram utilizadas peneiras Tyler na seguintes medidas, especificadas abaixo em Mesh e em milímetros.

Tabela 1 Tamanho de peneiras

| MESH | Milímetro |
|------|-----------|
| 28 | 0.589 |
| 35 | 0.416 |
| 48 | 0.294 |
| 65 | 0.208 |
| 100 | 0.147 |
| 150 | 0.104 |
| 200 | 0.073 |
| 270 | 0.053 |

ESTUDO DA MORFOLOGIA E TOPOGRAFIA DAS PARTÍCULAS

A morfologia e a topografia das partículas foram estudadas utilizando-se Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Óptica com Luz Transmitida.

A (MEV) foi feita em um microscópio eletrônico de varredura CAMBRIGE STEREOSCAN modelo S4-10. As amostras examinadas eram o próprio pó, da maneira como recebido, sem qualquer modificação. A preparação consistiu, basicamente, da fixação de uma pequena quantidade do pó, através do uso de um adesivo instantâneo, no suporte específico do microscópio. Por ser o polímero não condutor, foi necessário o recobrimento da amostra por uma fina camada de ouro depositada por sputtering. A Microscopia Óptica com Luz Transmitida foi feita em um microscópio NIKON LABOPHOT-104. Novamente as amostras eram preparadas a partir do polímero na forma como recebido, sendo depositada uma pequena quantidade de pó sobre a lâmina e, então, pingadas algumas gotas de óleo de imersão com baixo índice de refração, para promover a separação das partículas aglomeradas, possibilitando a visão das mesmas separadamente.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

O comportamento térmico foi estudado com o uso da Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), tendo sido utilizados os seguintes equipamentos: Du Pont DSC 2910 e Perkin-Elmer DSC 7, série DELTA. A determinação da cristalinidade foi feita para todos os caso aqui descritos pelo levantamento da entalpia específica de fusão da fase cristalina.

Inicialmente determinou-se o percentual de cristalinidade do polímero nascente através de termogramas, com a aplicação de taxas de aquecimento de 30^oC/min..

Para verificar a influência das taxas de resfriamento no percentual de cristalinidade, foram feitos termogramas de DSC onde o material era aquecido a taxa de 10^oC/min. até 170^oC, mantido nesta condição por cinco (5) minutos e resfriado a taxas controlada de 5^oC/min., 10^oC/min. e 15^oC/min.

As alterações geradas no material, em termos do percentual de cristalinidade, devido à fusão e resfriamento, foram estudadas mediante a realização de Calorimetria Diferencial de Varredura na seguinte condição: o material foi inicialmente aquecido até 200°C, fundindo-se, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min., onde se determinou o percentual de cristalinidade inicial; posteriormente foi resfriado na mesma taxa do aquecimento até a temperatura ambiente e aquecido novamente nas mesmas condições iniciais, determinando-se, então, o percentual de cristalinidade pós uma fusão e solidificação. O ciclo calorimétrico deste ensaio pode ser representado pelo termograma abaixo:

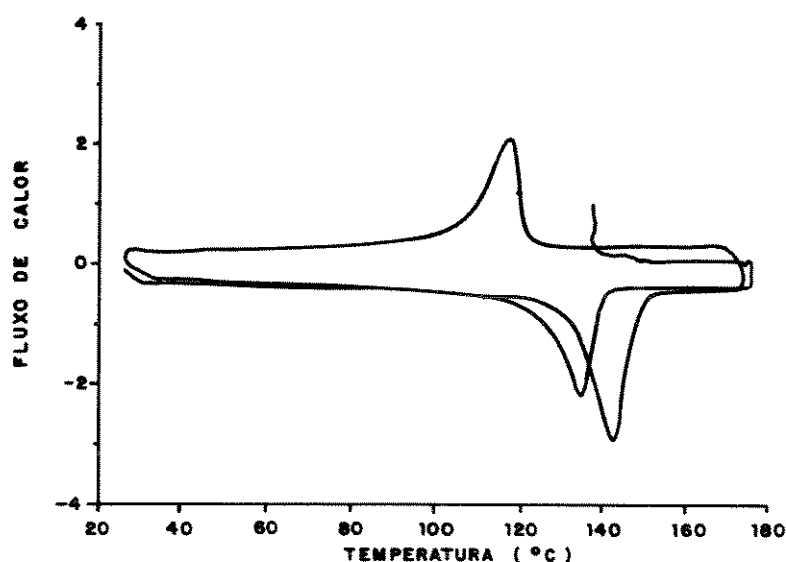


Fig. 12 Termograma de DSC, representando ciclo de fusão seguido de solidificação e nova fusão para determinação do percentual de cristalinidade

RESULTADOS

TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍCULAS

O tamanho médio das partículas é a média ponderada da distribuição de tamanhos, obtida pelo peneiramento. Tanto distribuição quanto tamanho médio, fornecem uma importante característica do material, com relação ao comportamento do mesmo para o processamento [17].

Os resultados obtidos estão listados na Tabela 2, onde constam: abertura da peneira (em Mesh) e o percentual em peso retido por peneira, para cada material:

Tabela 2 - Distribuição do tamanho de partículas

| Peneira Tyler (% Retido) | 28 | 35 | 48 | 65 | 100 | 150 | 200 | 270 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| UTEC 3540 | 2.25 | 10.13 | 31.35 | 23.05 | 21.87 | 8.15 | 3.2 | - |
| GUR 413 | 0.15 | 2.15 | 8.06 | 13.50 | 28.64 | 31.82 | 14.50 | 1.18 |

Os resultados mostrados na tabela acima indicam que o UTEC 3540 apresenta uma distribuição tendendo à valores maiores que o GUR 413.

A partir da distribuição do tamanho de partículas temos o tamanho médio para os dois materiais:

UTEC 3540 - 250 MICRA

GUR 413 - 160 MICRA

MORFOLOGIA E TOPOGRAFIA DAS PARTÍCULAS

Por serem de menor tamanho, conforme pôde ser verificado no item anterior, foi necessário maiores ampliações nas micrografias para as partículas de GUR 413 em relação às de UTEC 3540. Esta diferença em ampliação não acarreta em alterações quanto a resultados pois este estudo tem como finalidade a verificação do formato das partículas e das suas superfícies.

A morfologia e topografia das partículas de ambos os materiais apresentam-se semelhantes. Através da microscopia óptica, já é possível notar que os materiais tem formatos próximos. As figuras a seguir mostram as partículas de UTEC e de GUR, onde percebe-se que em ambos os caso existe uma tendência ao formato esférico. Percebe-se também, com o aumento da ampliação, que existe diferença quanto à rugosidade superficial das partículas.

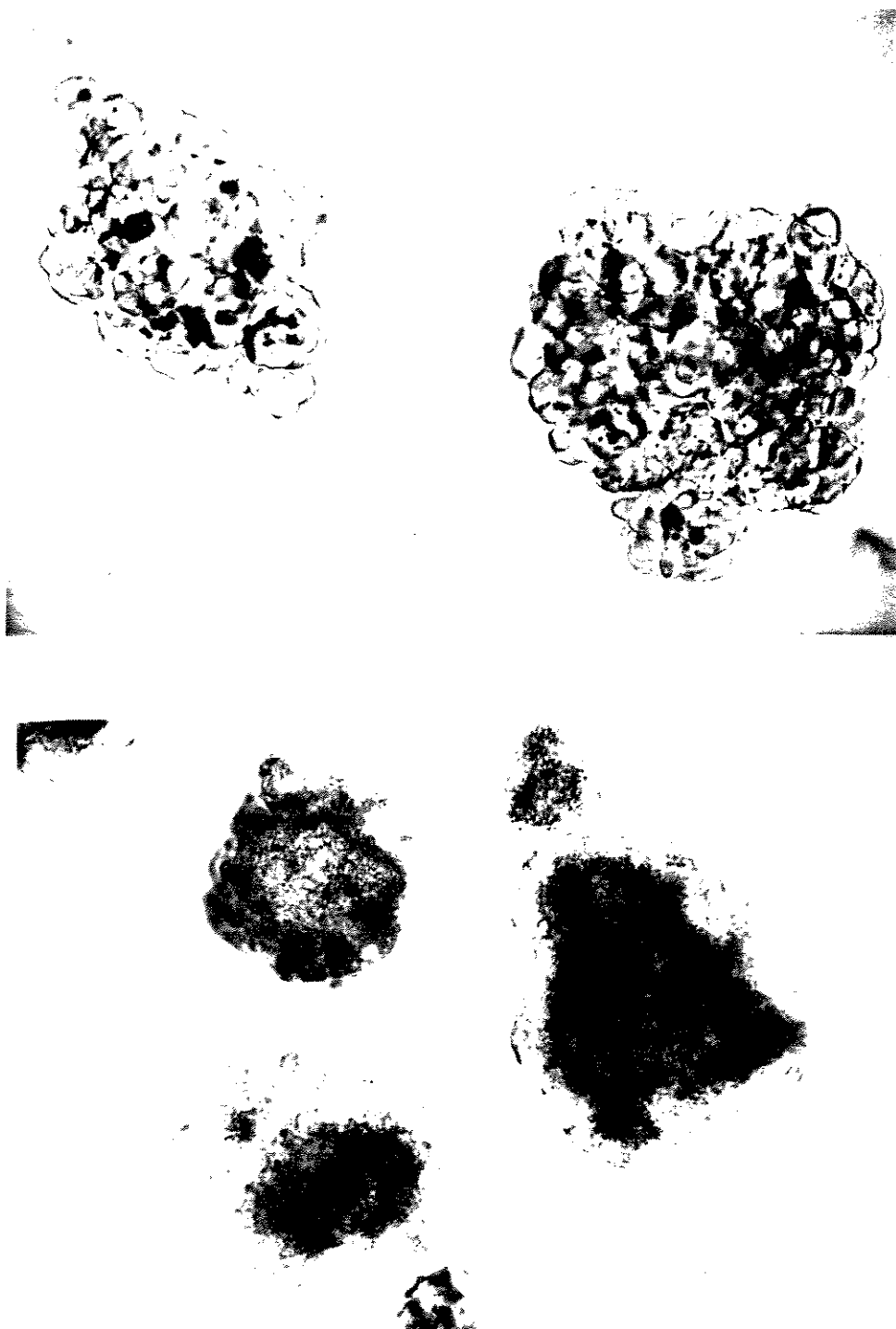


Fig. 13 Micrografias ópticas de UTEC 3540 100X (superior) e GUR 413 200X (inferior), mostrando a semelhança quanto ao formato entre as partículas de ambos materiais



Fig. 14 Micrografias ópticas de UTEC 3540 200X (superior) e Gur 413 400X (inferior), mostrando diferença quanto à rugosidade superficial de ambos materiais

Analisando-se as partículas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pode-se ver que as estas apresentam-se, de fato, semelhantes quanto ao formato e com diferenças razoáveis quanto à rugosidade das superfícies.

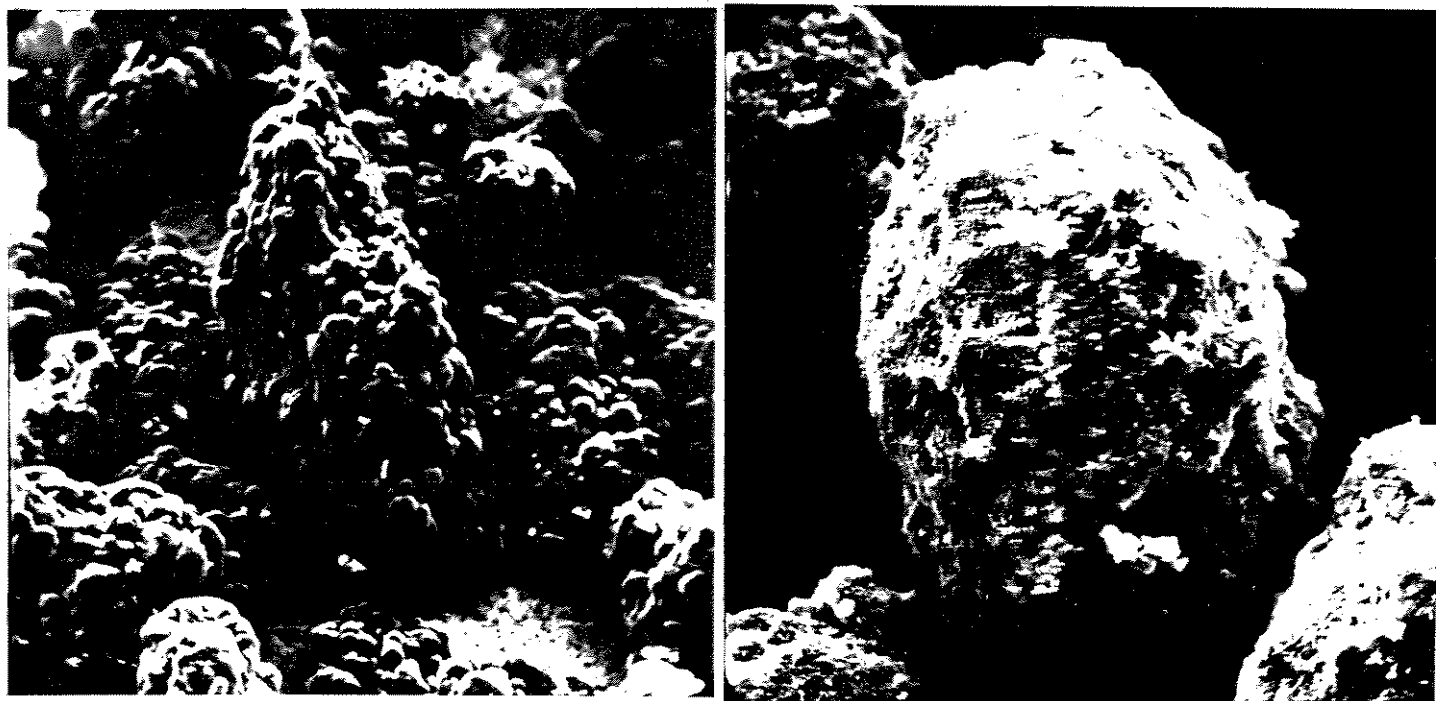


Fig.15 Micrografias por MEV de UTEC 3540 750X (esquerda) e Gur 413 1950X (direita), mostrando semelhança de formato e diferença quanto à rugosidade superficial de ambos materiais

As irregularidade da superfície das partículas são um conjunto de microesferas, que aparecem de maneira idêntica nos dois materiais, porém em tamanhos diferentes. Assim, no UTEC as microesferas são visíveis a uma menor ampliação que no GUR.

Para uma maior ampliação, dentro da mesma região, pode-se ver que estas microesferas são interconectadas por uma rede de microfibrilas. Estas microfibrilas são o resultado da expansão progressiva da partícula, devido ao contínuo crescimento das cadeias poliméricas durante o processo de polimerização [15].

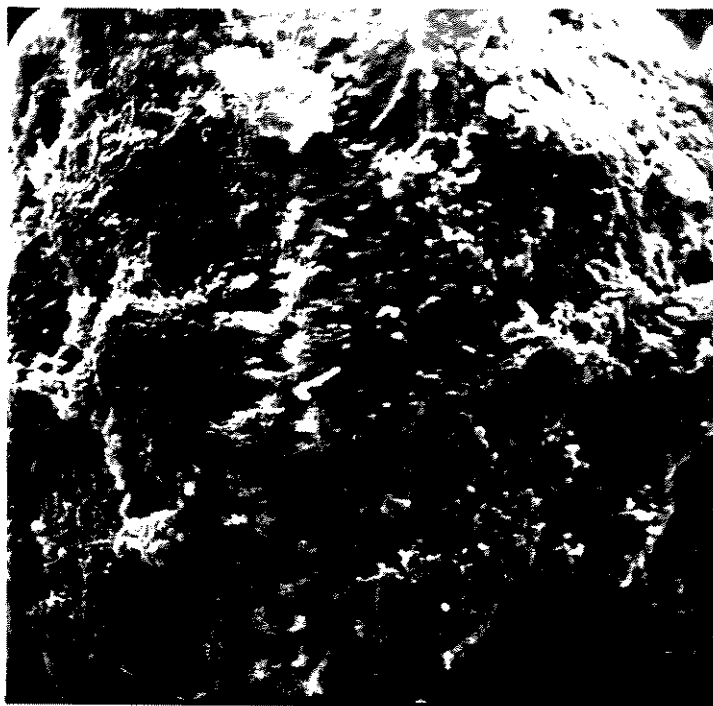


Fig. 16 Micrografias por MEV de UTEC 3540 1050X (esquerda) e Gur 413 2600X (direita), mostrando a composição das superfícies a partir de microesferas, porém e tamanhos diferentes entre os dois materiais

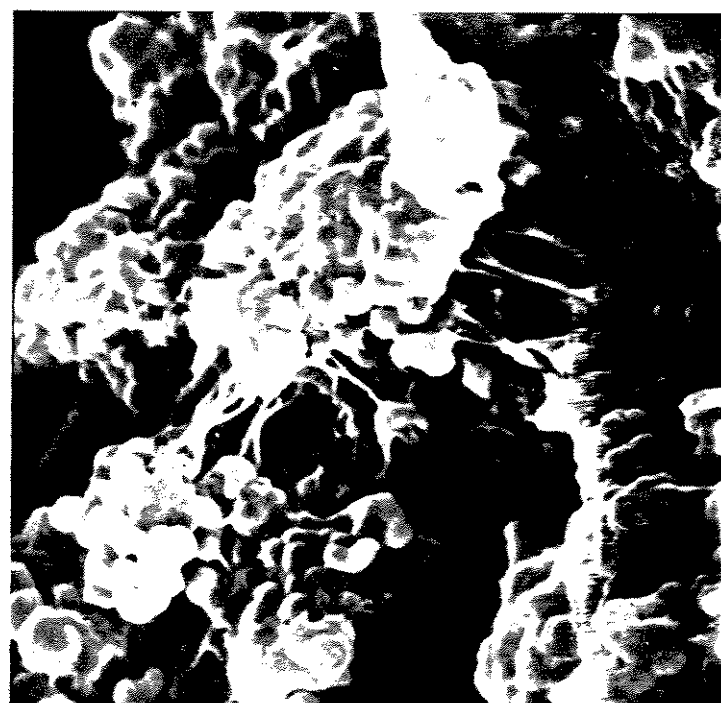


Fig. 17 Micrografias por MEV de UTEC 3540 15000X (esquerda) e Gur 413 18000X (direita), mostrando as microfibrilas que interligam as microesferas, nos dois materiais

COMPORTAMENTO TÉRMICO

Para a determinação do percentual de cristalinidade utilizou-se a entalpia específica de fusão do polietileno (E.E.F.) 100 % cristalino como 276 J/g [16].

Utilizando-se taxas de 30°C/min. foram traçados os termogramas abaixo.

As entalpias específicas de fusão e os percentuais de cristalinidade dos dois materiais estão na tabela abaixo.

Tabela 3 - Entalpia específica de fusão (E.E.F.) e percentual de cristalinidade para UTEC 3540 e GUR 413

| Material | E.E.F | % de crist. |
|-----------|--------|-------------|
| UTEC 3540 | 181.74 | 65.84 |
| GUR 413 | 185.24 | 67.11 |

Para a determinação da influência das taxas de resfriamento no percentual de cristalinidade obteve-se três termogramas de DSC para cada material. Pode-se notar pelos termogramas que as temperaturas de fusão apresentam pequenas diferenças entre os materiais, porém as do GUR sempre se apresentam maiores que as do UTEC.

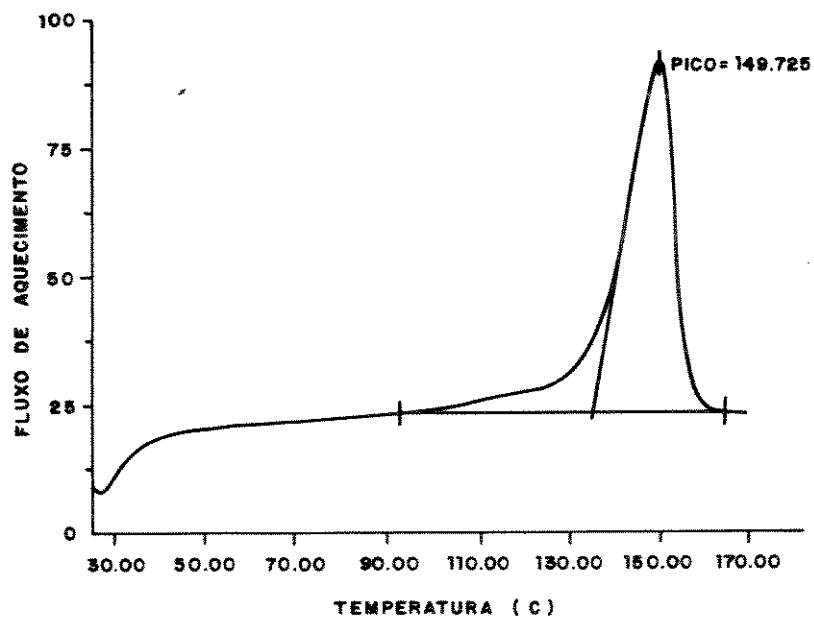
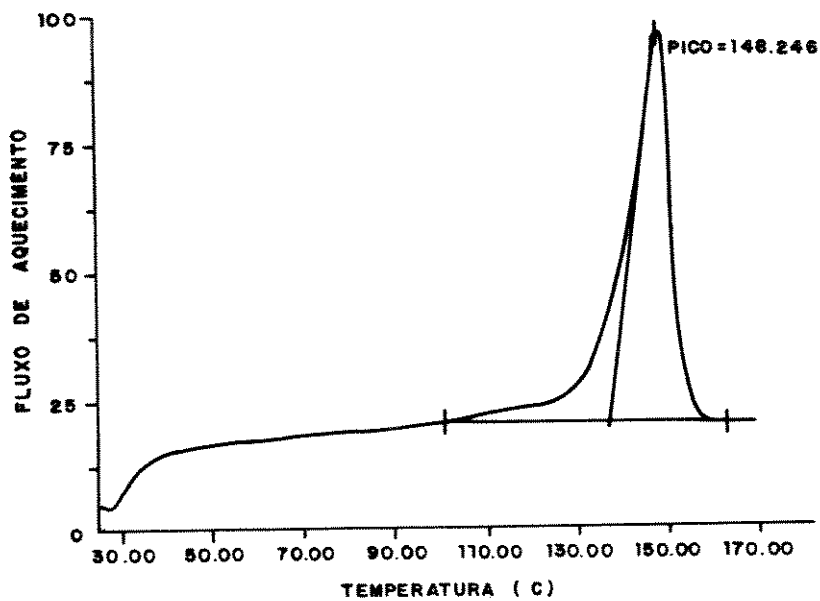


Fig.18 Termograma de DSC Taxa de aquecimento = 30°C/min.
UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

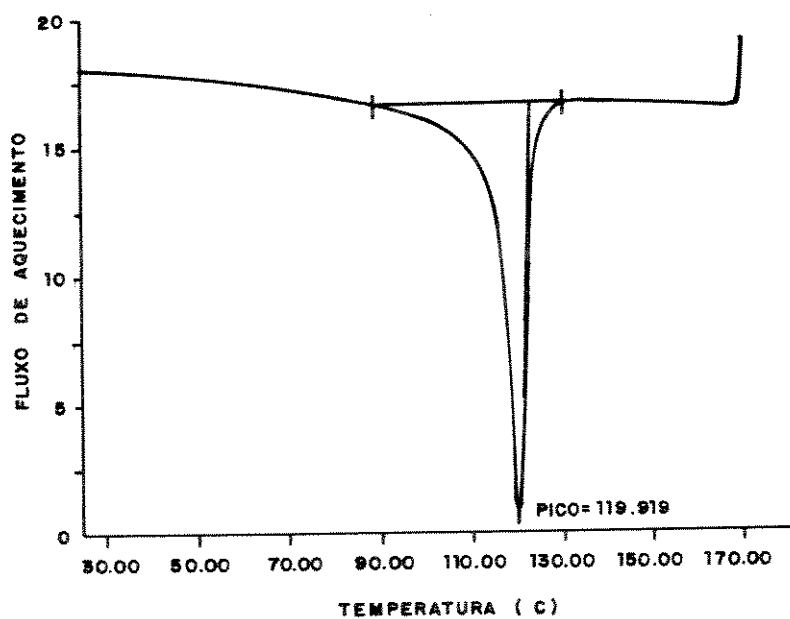
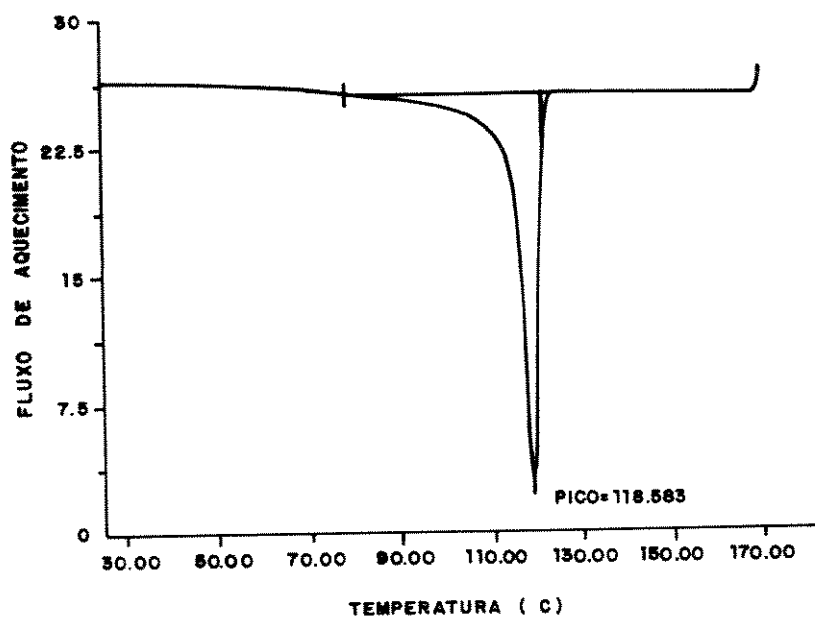


Fig.19 Termogramas de DSC Taxa de resfriamento = 5^oC/min.
UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

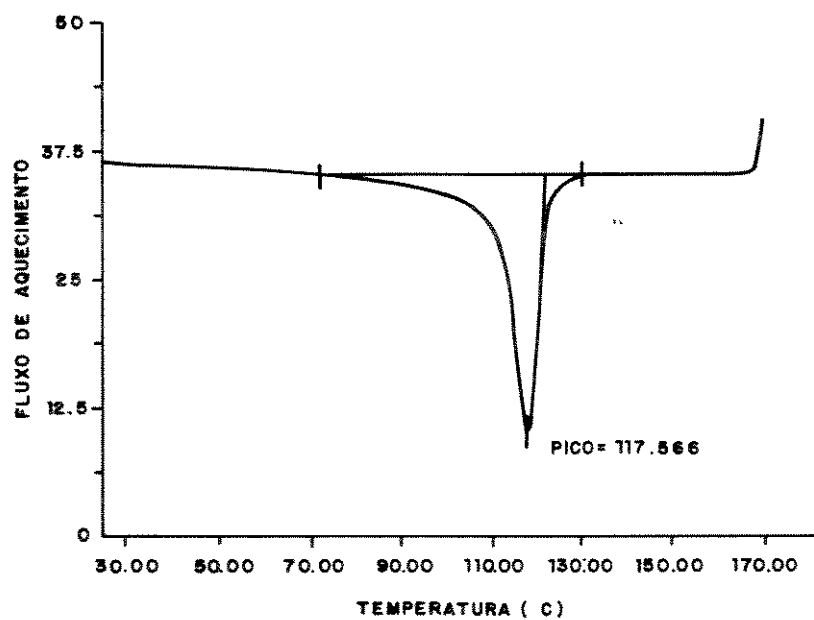
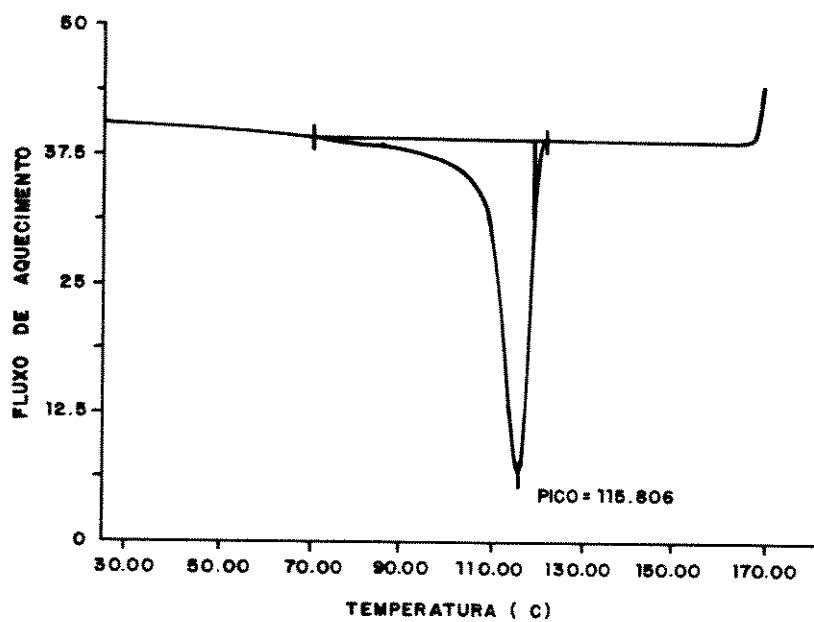


Fig.20 Termogramas de DSC Taxa de resfriamento = 10⁰C/min.
UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

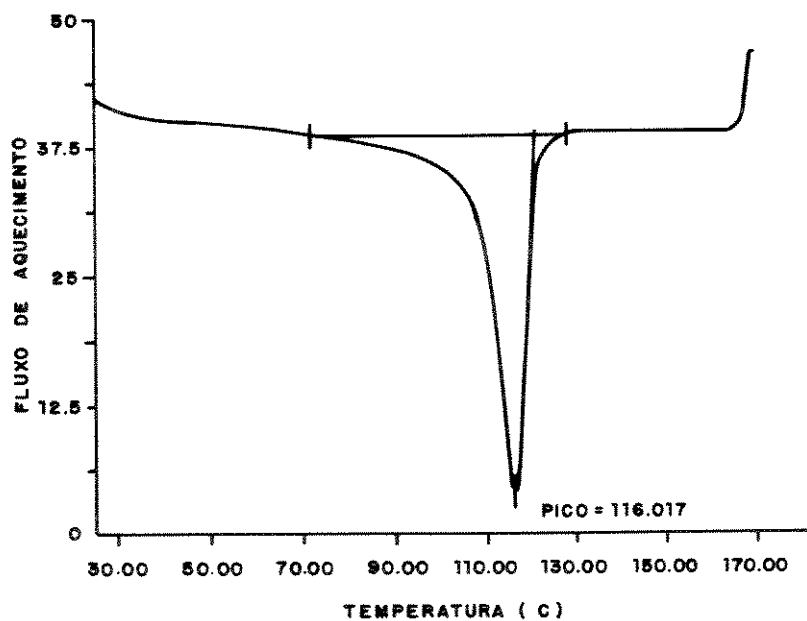
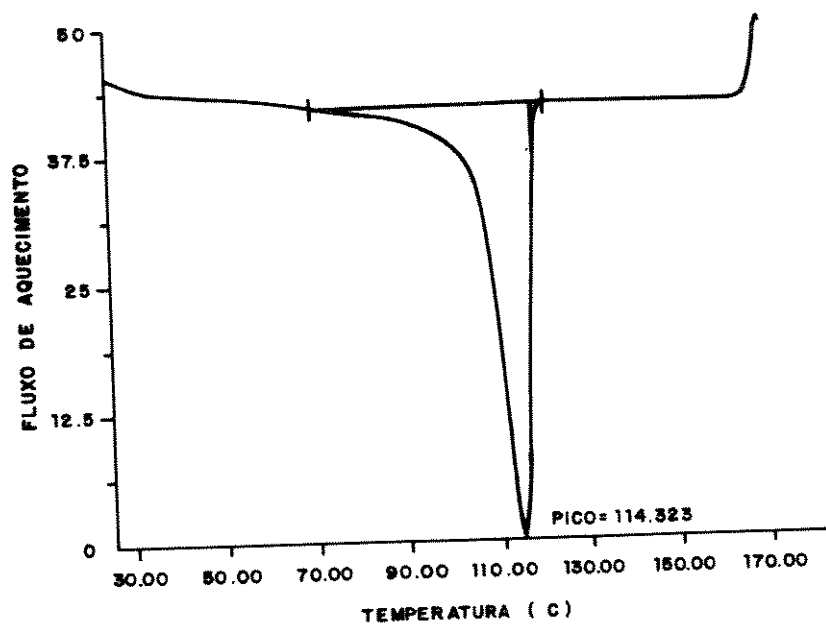


Fig. 21 Termogramas de DSC Taxa de resfriamento = 15⁰C/min.
UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

A partir da entalpia específica de fusão foram determinadas as cristalinidades obtidas, para as três taxas especificadas. A tabela 3 mostra os resultados.

Tabela 3 - Percentual de cristalinidade obtidos em função das taxas de resfriamento impostas

| Material | 5°C/min. | 10°C/min. | 15°C/min. | Taxa de resfr. |
|-----------|----------|-----------|-----------|------------------------------|
| UTEC 3540 | 51.80 | 52.21 | 51.32 | percentual de cristalinidade |
| GUR 413 | 44.50 | 47.25 | 46.78 | |

Foram traçados quatro termogramas para a determinação da influência da fusão e solidificação no percentual de cristalinidade dos materiais. Dois são referentes aos polímeros nascentes sob taxa de aquecimento de 10°C/min. e dois outros referentes ao aquecimento da amostra fundida e solidificada, também sob taxa de 10°C/min..

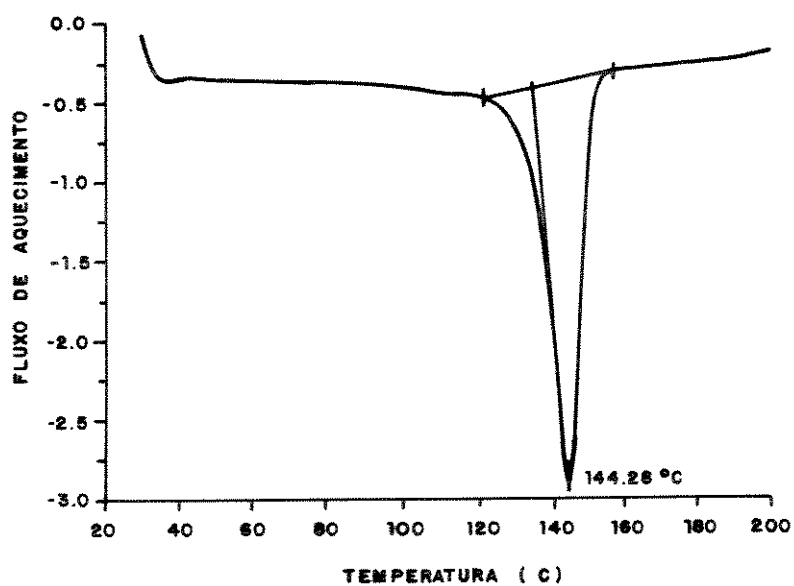
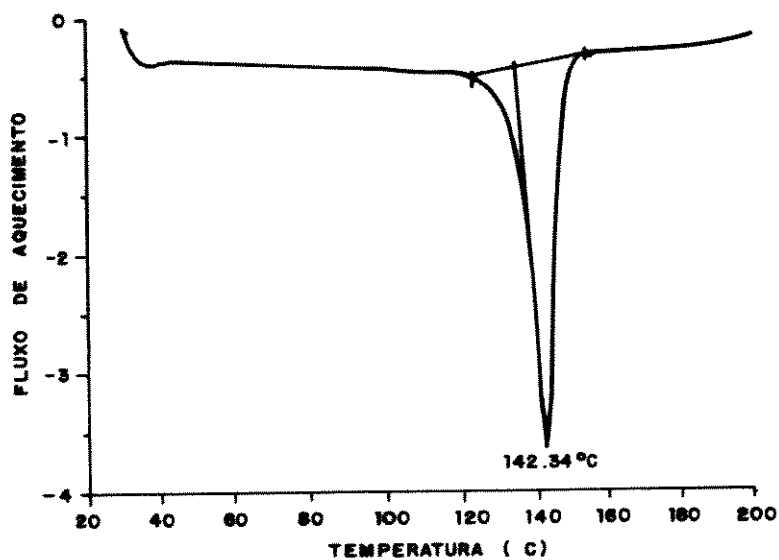


Fig. 22 Termogramas de DSC do polímero nascente Taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

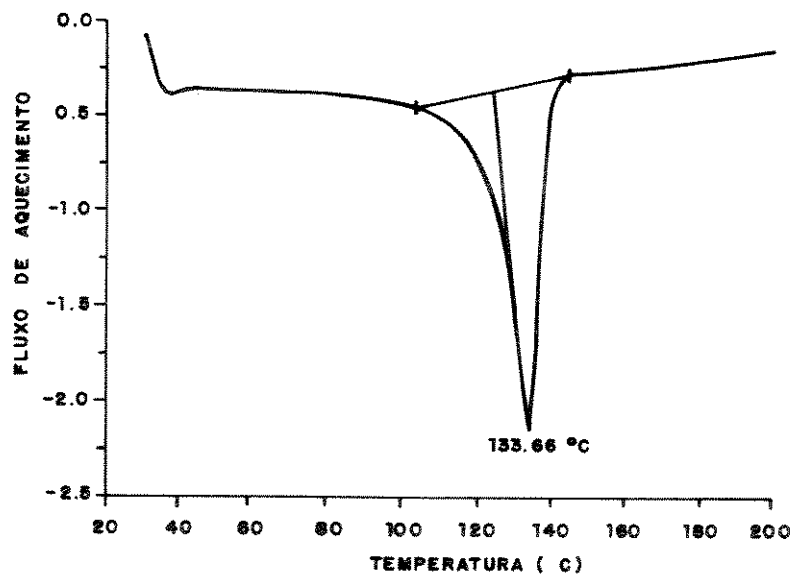
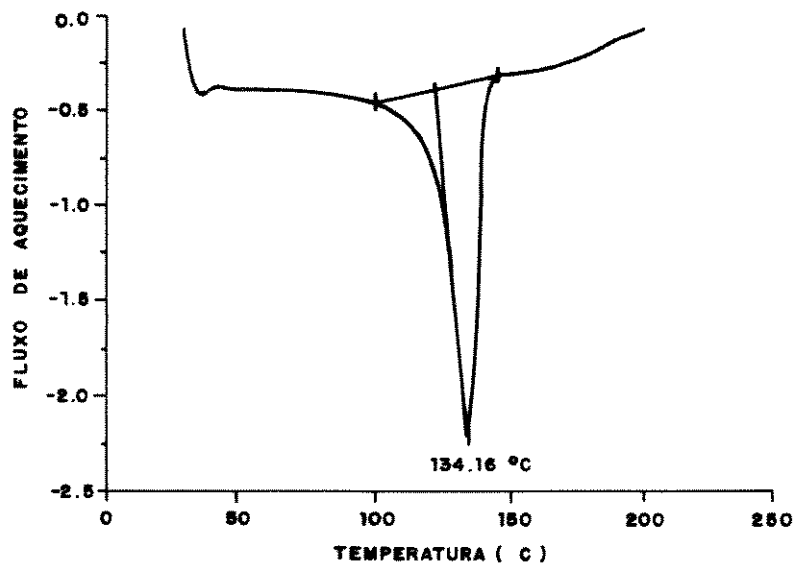


Fig. 23 Termogramas de DSC do polímero pós fusão e solidificação Taxa de 10⁰C/min. UTEC 3540 (superior) GUR 413 (inferior)

Calculando-se o percentual de cristalinidade para o polímero nascente e na condição pós fusão e solidificação, foram obtidos os valores listados na tabela 4.

Tabela 4 - Entalpia específica de fusão (E.E.F) e percentual de cristalinidade para polímero nascente e na condição pós fusão e solidificação

| Material | Pol. nascente | | Fundido e resfriado | |
|-----------|---------------|----------|---------------------|----------|
| | E.E.F. | % crist. | E.E.F. | % crist. |
| UTEC 3540 | 168.5 | 61.05 | 142.9 | 51.77 |
| GUR 413 | 160.5 | 58.15 | 122.8 | 44.49 |

CONCLUSÃO QUANTO AO ESTUDO DA MATÉRIA PRIMA

Foi realizado o estudo de dois Polietilenos de Ultra Alto Peso Molecular, um de fabricação nacional e o outro de origem alemã. Sendo o material nacional de produção recente, o alemão é, ainda hoje, o mais largamente utilizado para a fabricação das chapas e tarugos, a partir dos quais são confeccionados os componentes de prótese ortopédicas.

A caracterização das duas resinas teve, basicamente, dois objetivos: determinar características do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular que possam influenciar os parâmetros de processamento, e referenciar a resina nacional baseando-se no material alemão, de uso já consagrado.

O GUR 413 apresentou tamanho médio das partículas menor que o UTEC 3540. Isto pode significar que o primeiro apresenta razão de compactação [17] (densidade aparente por densidade do compactado em verde) maior que o segundo, devido a uma melhor acomodação das partículas. Esta característica poderá resultar em melhores propriedades finais do moldado, tanto mecânicas quanto a estabilidade dimensional.

A morfologia mostrou-se semelhante entre os dois materiais. Ambos apresentam partículas tendendo a um formato esférico, o que em comparação a formatos fibrilares de partículas de PEUAPM apresentado por Halldin et alli [24] indica uma densidade

aparente menor, tanto para o GUR quanto para o UTEC. Além da morfologia, os materiais apresentam também topografia das partículas semelhantes. Isto pode estar relacionado ao processo de polimerização utilizado, pois em ambos os casos o material é polimerizado pelo sistema de Ziegler-Natta. As partículas apresentam uma rede de microfibrilas ligando as microesferas que as compõe, o que também pode estar relacionado ao tipo de reação de polimerização utilizada.

O comportamento térmico de ambos materiais é bastante semelhante. As temperaturas de fusão da fase cristalina para os dois caso apresentam-se próximas, bem como o percentual de cristalinidade. Existe uma pequena diferença quanto à sensibilidade ao processo de fusão seguida de solidificação. A cristalinidade do GUR é reduzida de 13.66 % enquanto o UTEC cai 9.14 %. Isto implica em diferença na cinética de cristalização, sendo a do GUR menor para as condições do ensaio que a do UTEC.

A cinética de cristalização foi superficialmente estudada com a realização de Calorimetria Diferencial de Varredura nas três taxas de resfriamento impostas. Os resultados obtidos podem levar a uma conclusão errada, pois a entalpia específica de fusão para os dois materiais é maior na condição de resfriamento a $10^{\circ}\text{C}/\text{min.}$. A partir disto pode-se concluir que esta seja a condição próxima da máxima cinética de cristalização. Porém estes poucos resultados não permitem uma conclusão mais acertada para um critério de difícil determinação. Senão vejamos: uma amostra de PEUAPM submetida a uma taxa de resfriamento de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ foi posteriormente submetida a DSC onde obteve-se, apenas para o UTEC, o termograma abaixo.

Pela entalpia específica de fusão determinada chega-se a um valor de cristalinidade de 72.93 %, o que significa uma diferença em percentual de cristalinidade em relação ao obtido para taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ de 19.68 % a mais.

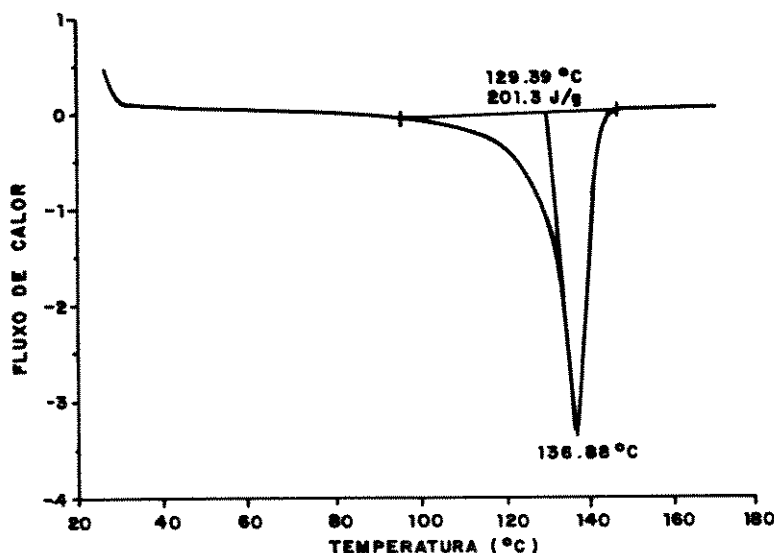


Fig. 24 Termograma de DSC de material submetido a Taxa de resfriamento = $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.
UTEK 3540

A caracterização das duas resinas forneceu alguns importantes resultados:

- 1-O material nacional UTEK 3540 apresenta características semelhantes ao alemão GUR 413, quanto a morfologia de partículas
- 2-Existe semelhança entre os materiais quanto à topografia superficial da partículas, porém em ordens de grandeza diferentes.
- 3-Existe uma maior sensibilidade ao processo de fusão e solidificação para o GUR 413 em relação ao UTEK 3540, quanto a cinética de cristalização.
- 4-O estudo da cinética de cristalização apresentou a taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. como tendendo aos maiores percentuais de cristalinidade, em comparação aos obtidos nas taxas de 5 e $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

PROCESSAMENTO E ENSAIO DE DESGASTE TESTANDO OS EQUIPAMENTOS

Após o projeto e construção dos dispositivos que compõe a infra-estrutura para o desenvolvimento do processo de fabricação, foram realizados testes de verificação: quanto ao comportamento dos equipamentos e correlacionamento ao estudo efetuado da matéria-prima. Assim foram moldados corpos de prova para ensaios de desgaste, testando-se o comportamento da prensa desenvolvida, da matriz de moldagem, do sistema de aquecimento e do isolamento térmico. Posteriormente os moldados foram ensaiados a desgaste, testando o funcionamento do dispositivo TRI-PIN-ON-DISC.

PROCESSAMENTO

O projeto da prensa, conforme já exposto, visa possibilitar o processamento do PEUAPM sob diferentes condições. Para efeito de teste do equipamento, foram moldadas algumas peças sendo o objetivo verificar a metodologia de processo adotada e a influência do equipamento nas características do processamento e do produto obtido.

O tipo de processamento adotado foi o de **moldagem por compressão** e seguiu a seguinte metodologia:

- 1- Compactação inicial para degaseificação e obtenção da densidade em verde, realizada sob pressão de 100 Kgf/cm².
- 2- Aquecimento do compactado, dentro da matriz, sob pressão de 20 Kgf/cm² a 250°C, permanecendo nesta temperatura por um intervalo de tempo suficiente até a fusão completa do polímero.
- 3- Resfriamento do material sob pressão de 100 Kgf/cm²

A degaseificação foi feita sempre por meio de três ciclos de compressão e descompressão, sendo que a fase de compressão tinha a duração controlada de 30 segundos. Para a obtenção de 100 Kgf/cm² na matriz, regulava-se a pressão da linha de ar comprimido em 1.5 Kgf/cm², uma vez que a matriz tendo 1.5 cm de diâmetro e o cilindro pneumático 12.5 cm, resulta em uma relação de áreas de aproximadamente 69.4.

O tempo de permanência do material a 250°C foi inicialmente de uma (1) hora. Verificou-se, no entanto, não ser o tempo suficiente. Analisando-se por microscopia ótica de reflexão (microscópio ótico de luz refletida Zeiss Neophot) a superfície inferior do cilindro moldado, percebia-se claramente que o coalescimento das partículas havia sido parcial (figura abaixo).

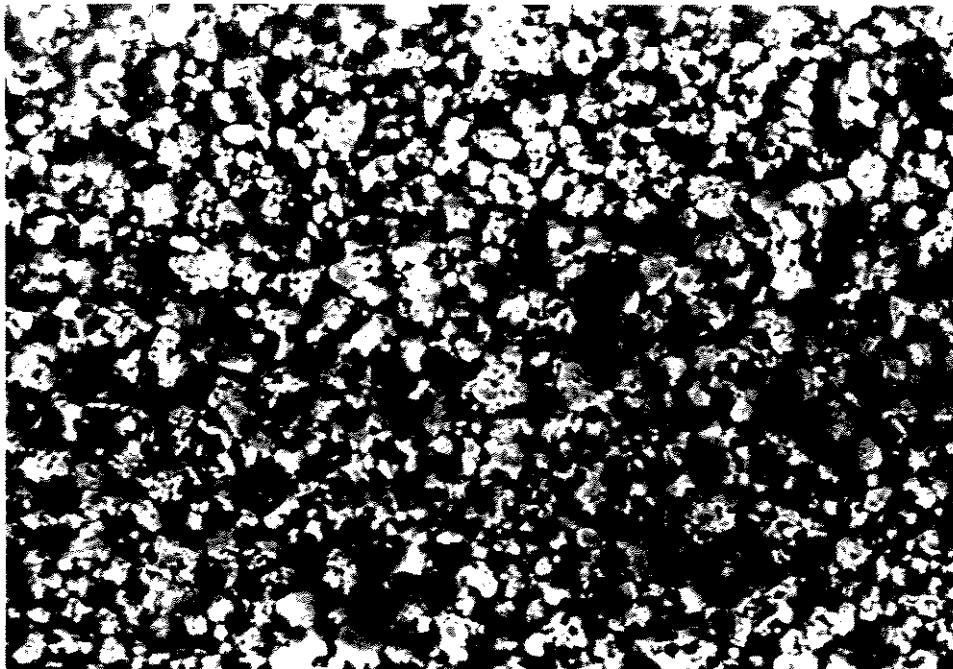


Fig. 25 Superfície do moldado com tempo de permanência a 250°C de 60 min. Pode-se perceber o coalescimento parcial das partículas, que conservam memória de grão

Com o aumento do tempo para duas horas, obteve-se a superfície abaixo, onde já não mais se percebe sinais de mau coalescimento. A exceção de uma falha na superfície, gerada no manuseio do moldado, percebe-se uma superfície uniforme, o que indica que obteve-se uma fusão mais próxima do ideal que no caso anterior.

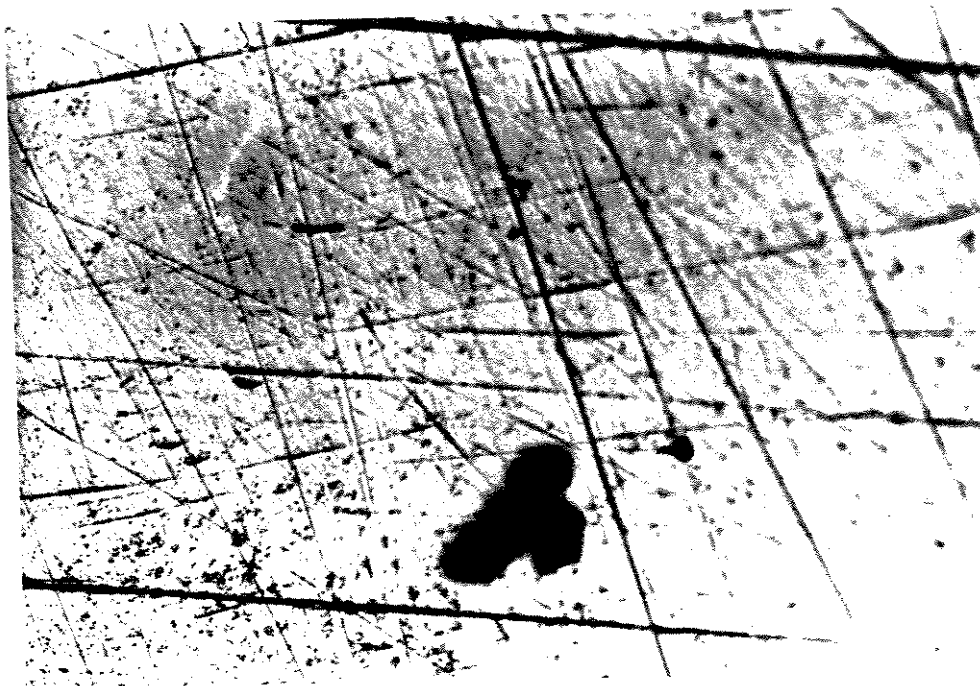


Fig. 26 Superfície do moldado com tempo de permanência a 250⁰C de 120 min. Não se percebe os contornos das partículas, caracterizando o coalescimento das mesmas

Foi verificada a influência do isolamento térmico processando-se material, nas condições acima descritas, com o uso de refratário tipo Barbutina e sem o mesmo. Foi traçada a curva de queda de temperatura do conjunto de processamento "material-matriz-isolamento térmico", para as duas condições.

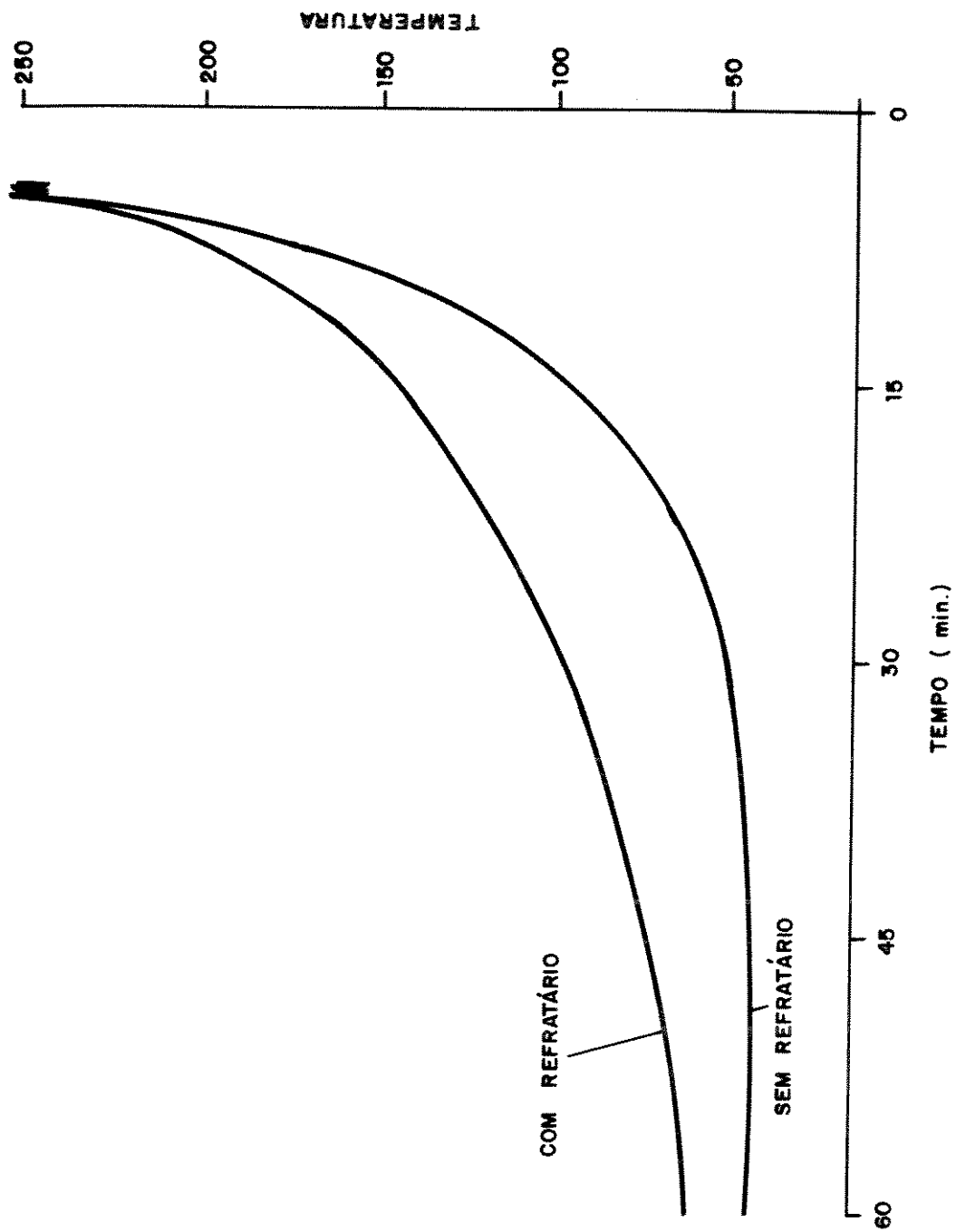


Fig.27 Curva de queda da temperatura do conjunto de processamento com e sem refratário tipo Barbutina

A variação da cristalinidade decorrente da alteração na taxa de resfriamento, foi verificada por Calorimetria Diferencial de Varredura a partir de amostras resfriadas nas duas condições. Apesar da alteração no resfriamento, não houve mudança significativa no percentual de cristalinidade, que manteve-se em 47.14 %.

A partir das moldagens efetuadas, verificou-se o funcionamento do equipamento. O sistema funcionou segundo o desejado, porém o isolamento térmico instalado permite o resfriamento segundo uma taxa elevada, o que acaba gerando um percentual de cristalinidade baixo. Esta taxa elevada pode ser explicada pelo fato de que o conjunto de processamento, na íntegra, totaliza uma pequena massa térmica. Desta forma não há uma correção factível por simples alteração do isolante térmico utilizado. A obtenção de percentuais de cristalinidade maiores pode ser feita com tratamento térmico de recozimento do polímero moldado, como uma quarta fase do processamento.

ENSAIO DE DESGASTE

A verificação do comportamento do dispositivo TRI-PIN-ON-DISC foi feita com a realização de três ensaios de desgaste a seco. Os ensaios utilizaram corpos de prova moldados no equipamento desenvolvido e tiveram duração de 5 (cinco) horas, totalizando 35000 ciclos, aproximadamente, o que representa um percurso de 9800 metros.

Foram utilizadas cargas normais pequenas, pois a ausência de lubrificação conduz ao superaquecimento do corpos de prova de polímeros. A carga utilizada resultou em tensão de compressão de 0.18 MPa nas faces de contato pino-disco. Para a velocidade de funcionamento do sistema temos o produto PV igual a 0.1 MPa m/seg., o que situa-se abaixo dos 0.3 MPa m/seg., limite para o PEUAPM, para condições a seco [38].

Com a realização dos primeiros ensaios pode-se verificar dois pontos a serem resolvidos no equipamento.

Em primeiro lugar o equipamento deve ter o seu redutor de velocidades vedado em um compartimento, a fim de evitar a contaminação do lubrificante das engrenagens e

conter o ruído, normal para este tipo de equipamento mecânico, mas desagradável no ambiente de trabalho.

A partir da análise das superfícies dos corpos de prova poliméricos, verificou-se que além do movimento relativo esperado entre as superfícies, ou seja apenas velocidade tangencial, ocorre, eventualmente, rotação dos pinos em torno do próprio eixo (movimento de Spin). A figura abaixo mostra a superfície de um dos pinos onde pode-se ver a sulcos de desgaste cruzando-se. Isto é um sinal claro de que ocorreu movimento relativo em mais de uma direção.

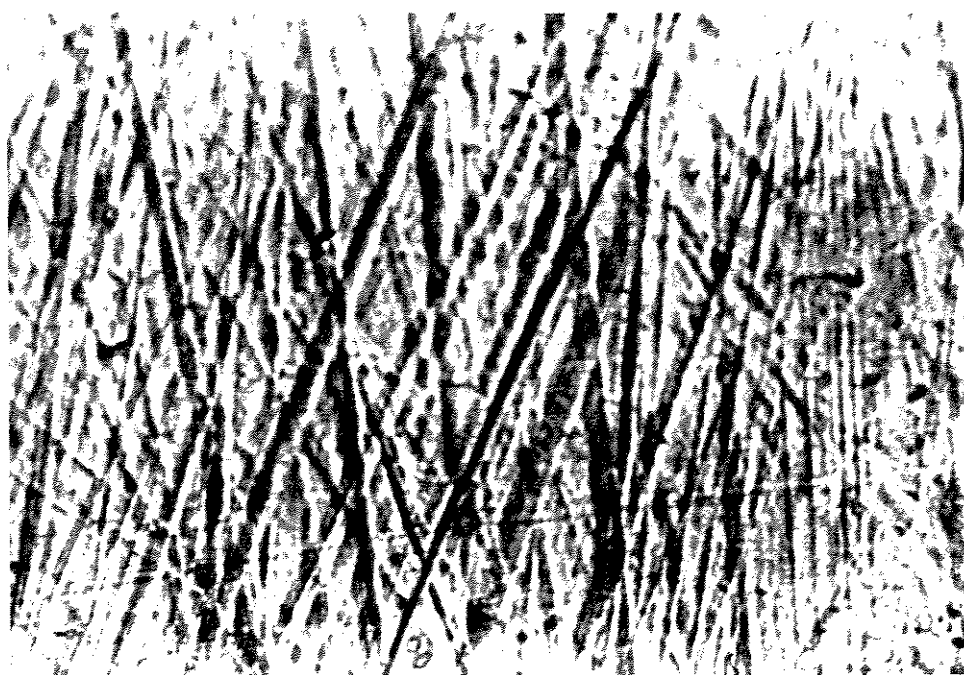


Fig. 28 Micrografia de superfície de desgaste do corpo de prova de PEUAPM, os sulcos cruzados indicam a ocorrência de movimento de Spin

Este problema foi facilmente eliminado, mediante uma pequena deformação na extremidade do pino a ser encaixada no furo da placa superior do dispositivo. Deve-se considerar que tal problema só ocorreu devido a utilização de uma carga normal bastante baixa, devido ao fato dos testes terem sido realizados sem lubrificação. A figura 29 mostra a superfície de desgaste obtida, quando corrigido o problema.



Fig. 29 Micrografia de superfície de desgaste do corpo de prova de PEUAPM. Notar que os sulcos de desgaste são paralelos.

CONCLUSÃO QUANTO AOS TESTES

Ao final dos testes conclui-se que os equipamentos operam segundo a intenção de projeto. Com a realização de testes foram levantados alguns problemas tanto na prensa para processamento, quanto no dispositivo de ensaio de desgaste. Aqueles que poderiam acarretar em perda da confiabilidade do equipamento relacionado, foram sanados ou claramente compreendidos, como o caso do isolamento térmico na matriz de processamento da prensa.

Como produto dos testes dos equipamentos pode-se, ainda, adquirir informações sobre características do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, tanto em processamento, quanto em desgaste.

CONCLUSÃO

- 1- A partir do conhecimento teórico dos métodos de processamento aplicáveis para o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, foi executado o projeto e a construção de um equipamento que permite produzir peças moldadas deste polímero, dentro de diferentes condições.
- 2- Foi projetado e construído um dispositivo de ensaio de desgaste em configuração TRI-PIN-ON-DISC, que possibilita a execução de ensaios em simulação às condições médias de velocidades relativas e tensões de compressão entre as superfícies de uma articulação de quadril.
- 3- Na realização de moldagens, no equipamento construído verificou-se que a fusão das partículas de PEUAPM, para uma peça de 15 mm de diâmetro e 35 mm de altura, só apresenta coalescimento aceitável (quando não mais é visível a memória de grão) com manutenção de temperatura em 250°C por 120 minutos ou mais.
- 4- Os pinos de desgaste devem ser firmemente fixados na placa superior do dispositivo TRI-PIN-ON-DISC de maneira a não permitir que ocorra movimento de Spin por parte destes.
- 5- As superfícies de desgaste dos pinos de PEUAPM apresentam sulcos cruzados, quando ocorre movimento de Spin dos mesmos.
- 6- As superfícies de desgaste dos pinos de PEUAPM apresentam sulcos paralelos para os casos de ensaios de desgaste normais.
- 7- O PEUAPM UTEC 3540 apresenta tamanho médio de partículas maior que o GUR 413.
- 8- A morfologia das partículas de UTEC 3540 e GUR 413 é semelhante, apresentando ambas a tendência ao formato esférico.
- 9- A topografia das superfícies das partículas de UTEC 3540 e GUR 413 é semelhante, porém em diferentes ordens de grandeza. As irregularidades superficiais do UTEC são

visíveis já em microscopia óptica, enquanto para o GUR só se percebe por microscopia eletrônica de varredura.

10- Tanto UTEC 3540 quanto GUR 413 apresentam formação de microfibrilas interligando as microesferas que compõe as partículas.

11- UTEC 3540 e GUR 413 apresentam valores de percentual de cristalinidade do polímero nascente, muito próximos.

13- A determinação da cinética de cristalização para UTEC e GUR apresenta a taxa de 10 c/min. como possível taxa de cinética máxima ou tendendo a isto.

14- UTEC e GUR apresentam queda do percentual de cristalinidade quando submetidos à fusão seguida de solidificação em taxas de 10°C/min, em comparação à cristalinidade do polímero nascente.

15- O polímero GUR 413 apresenta uma queda maior da cristalinidade, quando submetido à fusão seguida de solidificação, que o UTEC 3540.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1- Melhoria do equipamento de ensaio quanto à geração de ruído

2- Realização de ensaios de desgaste dos materiais disponíveis no mercado

3- Realização de ensaios de desgaste verificando a influência do grau de cristalinidade, da temperatura e da pressão de moldagem.

4- Levantamento da curva de cinética de cristalização do PEUAPM

5- Estudo da morfologia cristalina do PEUAPM

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gray, H., Anatomia. 29 Ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro (1977)
- [2] Gardner, E. et alli, Anatomia 3 Ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro (1971)
- [3] Ghadially, F. N., Fine structure of sinovial joints, 42 pp, Butterworths & Co, London (1983)
- [4] Rodriguez, F., Principles of polymer systems, 2 Ed, Hemisphere Publishing Corporation, Washington (1982)
- [5] Agnelli, J. A. M. et alli, Apostila de curso: Introdução aos polímeros, Assoc. Bras. de Polímeros, São Carlos (1990)
- [6] Fatou, J. G. et alli, The influence of molecular weight on the regime crystallization of linear polyethylene, Polymer, 31, 1685 (1990)
- [7] Seymour, R. B. et alli, Polymer chemistry. An introduction, Marcel Dekker, New York (1981)
- [8] Rudin, A., The elements of polymer science and engineering, Academic Press, Orlando (1982)
- [9] Birnkraut, W. H. et alli, Ultrahigh molecular weight polyethylene processing and properties, J. Appl. Polym. Sci.: Appl. Polym Symposium, 36, 79 (1981)
- [10] Ghidelli, L. C., Modificação de polietileno linear de ultra alto peso molecular através da incorporação de polietileno de alta densidade, Dissertação de Mestrado, DEMa Universidade Federal de São Carlos, (1987)
- [11] Hoeshst Plastics, Hostalen GUR (PE UHMW), catálogo do fabricante.
- [12] Krishnamurthy, V. et alli, Cold compaction and sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene containing a segregated iron network, Polym. Eng. Sci., 29(8), 564 (1989)
- [13] Truss, R. W. et alli, Cold compaction molding and sintering of ultra high molecular weight polyethylene, Polym. Eng. Sci., 20 (11), 747 (1980)

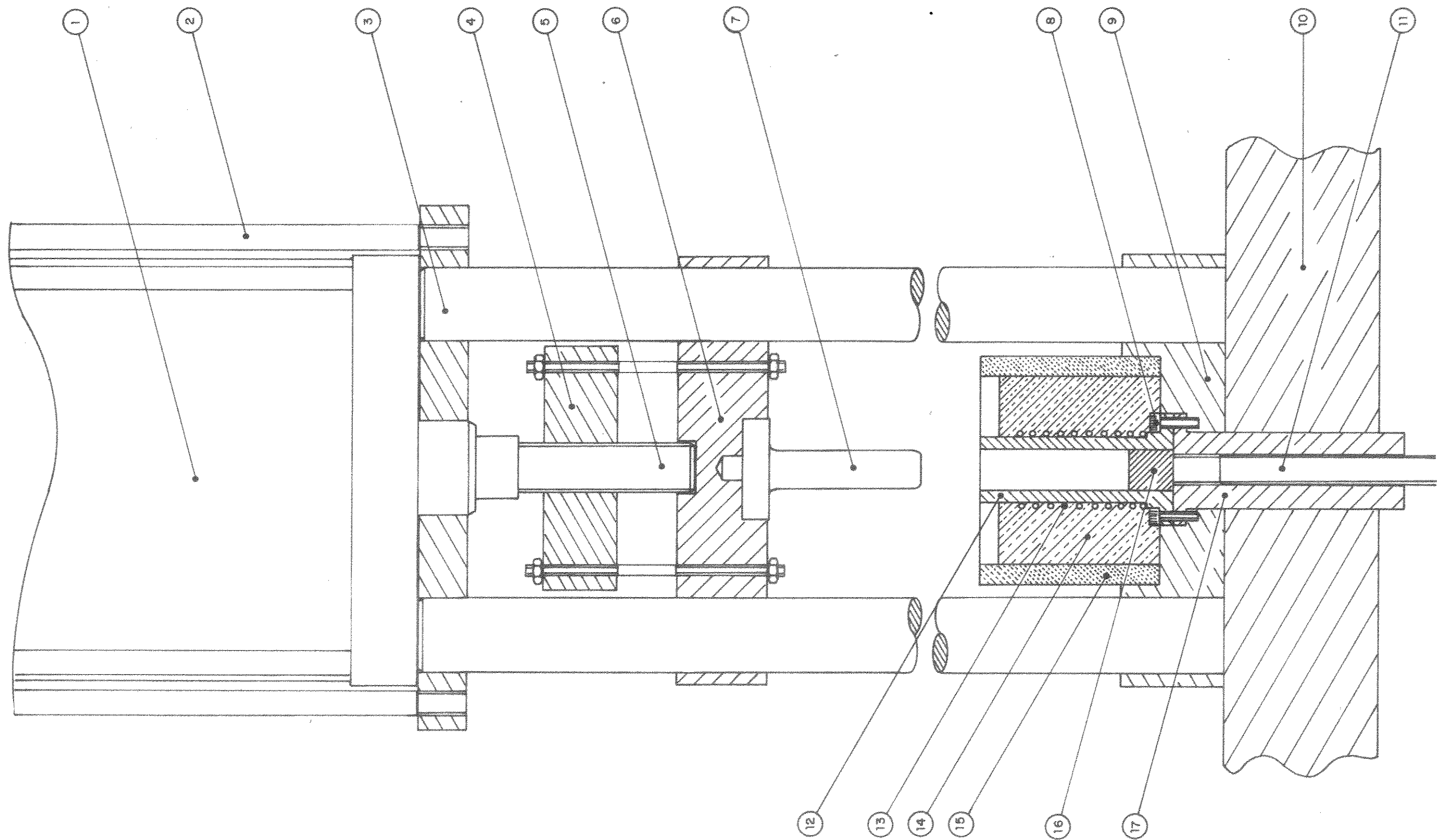
- [14] Zachariades, A. E., The effect of powder particle fusion on the mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene, *Polym. Eng. Sci.*, 25 (12), 747 (1985)
- [15] McKenna, G. B. et alli, Deformation and failure of ultra high molecular weight polyethylene. 39th Ann. Tech. Conf. Boston Massachusetts, vol 27, 82 (1981)
- [16] Ke, B. -in "Newer methods of polymer characterization" Ed. Interscience, New York (1964)
- [17] Baumgaertner, E. R., Ultra high molecular weight Polyethylene molding powder and molding process, US Patent Office 3,847, 888, USA (1974)
- [18] Halldin, G. H., Powder processing of ultra high molecular weight polyethylene, PhD thesis, Drexel University (1980)
- [19] Fabian, R. J., Engineer's guide to UHMW polyethylene, *Materials Engineering*, September, 34 (1971)
- [20] Shenoy, A. V. et alli, Compression moulding of Ultra High Molecular Weight Polyethylene, *Plast. and Rubber Proces. and Applic.*, 5, 313 (1985)
- [21] Wang, X. et alli, Processing of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, 35, 2165 (1988)
- [22] Berzen, J. et alli, Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMW-PE): Application in Artificial Joints, *Br. Polym. J.* 10, 281 (1978)
- [23] Crissman, J. M. et alli, On the mechanical preconditioning of ultra high molecular weight polyethylene at small uniaxial deformations, *J. Polym. Sci.: Poly. Phys. Edition*, 23, 2599 (1985)
- [24] Halldin, G. W. et alli, Powder processing of ultra high molecular weight polyethylene I. Powder characterization and compaction, *Polym. Eng. and Sci.*, 17 (1), 21 (1977)
- [25] Anton, C. et alli, Extrusion processing of ultra high molecular weight polyethylene; a new method for production of high performance structures, *Polymer Bulletin*, 17, 175 (1987)


- [26] Hitoshi, M. et alli, Fiber reinforced polymer molded body, European Patent Application 88304944.7 (1988)
- [27] Aoyama, T. et alli, Method for preparing molded articles of ultra high molecular weight polyethylene, US Patent Office 4.876.049, US (1989)
- [28] Han, K. S. et alli, Powder compaction, sintering, and rolling of ultra high molecular weight polyethylene and its composites, *J. Macromol. Sci.-Phys.*, B19(3), 313 (1981)
- [29] Zachariades, A. E. et ali. The melt anisotropy of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene, 21, 821 (1983)
- [30] Zapas, L. J. et alli, Creep and recovery behaviour of ultra high molecular weight polyethylene in the region of small uniaxial deformations, *Polymer*, 25, 57 (1984)
- [31] Rabinowicz, E., Friction and wear of materials, John Wiley and Sons, New York (1965)
- [32] Purquerio, B. M. et alli, Apostila de curso, Elementos de tribologia, Universidade de São Paulo - EESC, São Carlos (1982)
- [33] Marquet, P. J. G., Biomechanics of the hip, Springer-Verlag, New York (1985)
- [34] Dowling, J. M. et alli, The characteristics of acetabular cups worn in the human body, *J. Bone Joint Surg.*, 60 B, 3 (1978)
- [35] Livermore, J. et alli, Effect of femoral head size on the wear of polyethylene acetabular component, *J. Bone and Joint Surg.*, 72 A (4), 518 (1990)
- [36] Crissman, G. B. et alli, Creep and stress-relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene in uniaxial tension and compression, *SPE Antec Technical*, 28, 55 (1982)
- [37] Mow, V. C. et alli, Influence of load bearing on the fluid transport and mechanical properties of articular cartilage. In " Joint Loading" , Wright, Bristol (1987)
- [38] Barrett, T. S. et alli, Effects of roughness and sliding speed on the wear and friction of ultra high molecular weight polyethylene, *Wear*, 153, 331 (1992)

- [39] Grood, E. S. et alli, Analysis of retrieved implants: Crystallinity changes in ultrahigh molecular weight polyethylene, *J. Biomed. Mater. Res.*, 16, 399 (1982)
- [40] Eyerer, P. et alli, Property changes of UHMW polyethylene hip cup endoprostheses during implantation, *J. Biomed. Mater. Res.*, 18, 1137 (1984)
- [41] Rose, R. M. et alli, On the origins of High *in vivo* wear rates in polyethylene components of total joint prostheses, *Clin. Orthop. and Related Res.*, 145 (1979)
- [42] Rose, R. M. et alli, Wear of polyethylene in the total hip prosthesis, *Clin. Orthop. and Related Res.*, 170 (1982)
- [43] Weightman, B. et alli, The fracture of ultrahigh molecular weight polyethylene in the human body, *J. Biomed. Mater. Res.*, NOTE, 13, 669 (1979)
- [44] Brown, K. J. et alli, The wear of Ultrahigh molecular weight polyethylene and a preliminary study of its relation to the *in vivo* behaviour of replacement hip joints, *Wear*, 40, 255 (1976)
- [45] Salvati, E. A. et alli, Fracture of polyethylene acetabular cups, *J. Bone and Joint Surg.*, 61 A, 8 (1979)
- [46] Rostoker, W. et alli, Some new studies of the wear behavior of ultra high molecular weight polyethylene, *J. Biomed. Mater. Res.*, 10, 303 (1976)
- [47] Fusaro, R. L., Friction, wear, transfer and wear surface morphology of ultrahigh molecular weight polyethylene, *ASLE Trans.*, 28(1), 1 (1985)
- [48] McKellop, H. et alli, Wear characteristics of UHMW polyethylene: A method for accurately measuring extremely low wear rates, *J. Biomed. Mater. Res.*, 12, 895 (1978)
- [49] McKellop, H. et alli, Friction and wear properties of polymer, metal and ceramic prosthetic joint materials evaluated on multichannel screening device, *J. Biomed. Mater. Res.*, 15, 619 (1981)
- [50] Miller, D. A. et alli, A comparative evaluation of the wear of ultra high molecular weight polyethylene abraded by Ti-6Al-4V, *WEAR*, 28, 207 (1974)

- [51] Jones, W. R. et alli, Effect of gama irradiation on the friction and wear of ultrahigh molecular weight polyethylene, *Wear*, 70, 77 (1981)
- [52] Marcus, K., et alli, The effect of grinding direction on the nature of the transfer film formed during the sliding wear of ultrahigh molecular weight polyethylene, *Wear*, 151, 323 (1991)
- [53] Nusbaum, H. J., et alli, Wear mechanisms for Ultrahigh molecular weight polyethylene in total hip prosthesis, *J. Appl. Polym. Sci.*, 23, 777 (1976)
- [54] Shen, C. et alli, Friction and wear behavior of polyethylene in connction with joint replacement, *Wear*, 38, 291 (1976)
- [55] Dumbleton, J. H. et alli, The wear behavior of ultra high molecular weight polyethylene, *Wear*, 37, 279 (1976)
- [56] Rostoker, W. et alli, Contact Pressure Dependence of wear rates of ultra high molecular weight polyethylene, *J. Biomed. Mater. Res.*, 13 957 (1979)

APÊNDICE A**DESENHO DE MONTAGEM DO CONJUNTO ESTRUTURA + MATRIZ DE
MOLDAGEM DA PRENSA PARA PROCESSAMENTO DE PEUAPM**



| | | | | | | | | |
|---|------------------|---|--------|------|----|------|-------|--|
|  UNICAMP | | CENTRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA/UNICAMP | | | | | | |
| | | TÍTULO: PRENSA PARA PROCESSAMENTO DE PEUAPM | | | | | | |
| DES. MAURO | DATA 27.04.93 | PROJ. MARCELO R. | VERIF. | REV. | DE | PARA | VISTO | |
| COD. | | ESC. | MAT. | REV. | DE | PARA | VISTO | |

LISTA DOS COMPONENTES

- 1- Cilindro Pneumático Festo DNB 125
- 2- Tirante de fixação do cilindro
- 3- Coluna-guia da estrutura
- 4- Placa de carregamento da mesa móvel
- 5- Haste do êmbolo do cilindro
- 6- Mesa móvel
- 7- Punção de compactação
- 8- Parafuso de fixação da matriz
- 9- Mesa inferior
- 10-Bancada
- 11-Pino roscado de extração
- 12-Matriz de moldagem
- 13-Resistência elétrica
- 14-Massa refratária de Barbutina
- 15-Tubo de isolamento de fibra mineral
- 16-Pastilha móvel do fundo
- 17-Tubo com rosca interna do sistema de extração

APÊNDICE B**DESENHO DE MONTAGEM DO DISPOSITIVO TRI-PIN-ON-DISC**

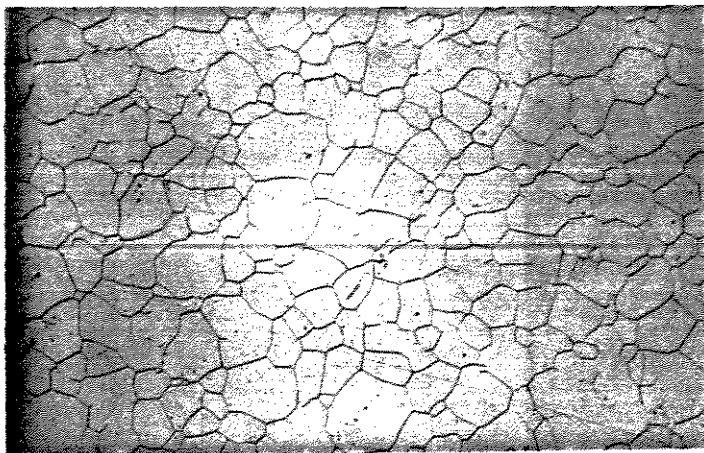
- 1- Campânula de proteção do Sistema de ensaio
- 2- Coluna-guia do conjunto superior
- 3- Alavanca de aplicação de força
- 4- Acoplador alavanca-esfera
- 5- Esfera de aço
- 6- Placa intermediária de carregamento
- 7- Parafuso guia-mola
- 8- Mola de compressão de aço inox
- 9- Placa superior
- 10-Borda do furo de encaixe do PINO
- 11-Corpo de Prova - PINO
- 12-Tubo de vidro - visor
- 13-Corpo de prova - DISCO
- 14-Pino de fixação do DISCO
- 15-Prato giratório
- 16-Carcaça do Sistema de Ensaio
- 17-Base do Sistema de Ensaio
- 18-Pino extrator do DISCO
- 19-Anel de vedação
- 20-Rolamento axial de rolos
- 21-Eixo de transmissão
- 22-Chaveta
- 23-Engrenagem do terciário
- 24-Polia do sistema contador de ciclos
- 25-Cabo giratório de transmissão do contador de ciclos
- 26-26-Contador de ciclos Veeder-Root
- 27-Motor de indução trifásico 3/4 hp WEG

28-Correia de transmissão V-32

29-Peso

30-Amortecedor de vibração Vibra-Stop médio

APÊNDICE C**FOTOS DO EXAME METALOGRÁFICO DOS DISCOS**



Superfície de um DISCO de ensaio de aço inoxidável 316L. A foto mostra os contornos de grão e a baixa quantidade de inclusões



Secção transversal de um DISCO de ensaio de aço inoxidável 316L. A foto mostra as linhas de laminação