

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O ACABAMENTO GERADO NO TORNEAMENTO DO
POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE).

por

Marcos Pandolfi Endres

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Endres, Marcos Pandolfi

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O ACABAMENTO GERADO NO TORNEAMENTO DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE). / Marcos Pandolfi Endres. -- 2021. 12 f.

Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Acabamento superficial. 2. UHMWPE. 3. torneamento. 4. otimização. I. João de Souza, André, orient. II. Título.

Marcos Pandolfi Endres

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O ACABAMENTO GERADO NO TORNEAMENTO DO
POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE).

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 21 de maio de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para chegar até aqui, onde um ciclo é encerrado e outro se inicia, com a certeza de que com fé e muito esforço chegarei tão alto quanto imaginei enquanto ainda criança.

Sou grato também, aos meus pais, Agilberto Endres e Inês Pandolfi Endres, que nunca mediram esforços para que não me faltasse nada tanto material quanto em forma de apoio, carinho e motivação, fundamentais para chegar ao fim desta caminhada. Além deles sou grato ao meu irmão André, que sempre me acalmou quando tudo parecia estar desabando e o foi o maior companheiro que uma pessoa poderia ter.

Agradeço à minha namora Letícia, que sempre foi um ponto de refúgio e esteve comigo em todos os momentos, mesmo que por vezes longe fisicamente. Assim, agradeço a todos os amigos, professores e colaboradores, que de uma maneira ou outra fizeram com que o meu sonho de ser Engenheiro se tornasse possível. Muito obrigado!

Além disso, sou grato também ao professor André João de Souza, que não apenas aceitou o desafio de fazer a orientação do meu trabalho de conclusão, mas também se dedicou e empenhou-se incansavelmente, sempre estando à disposição para me auxiliar durante todo o trabalho.

Sou muito grato também ao professor e amigo Alcy Rodolfo dos Santos Carrara, que nos deixou para continuar sua caminhada no céu. Uma pessoa que tive o prazer de conviver, ser orientado no período de estágio e aprender muito. Muito obrigado, Carrara!

*“A influência de um bom professor
jamais poderá ser apagada.”*

Alcy Rodolfo dos Santos Carrara.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O ACABAMENTO GERADO NO TORNEAMENTO DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE).

Resumo. *O presente trabalho teve como enfoque principal a revisão da literatura referente às condições de usinagem ideais para se obter o melhor acabamento em torneamento do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). Por meio desta pesquisa são buscados os principais parâmetros de usinagem, aos quais é possível obter a menor rugosidade da superfície usinada. Além disso, foi analisada a utilização de meios lubrificantes durante este processo para que a temperatura gerada durante o processo não fique acima das recomendadas para a usinagem deste polietileno. Embora haja uma vasta pesquisa a respeito do UHMWPE, o fato de ser um material com alta aplicabilidade na artroplastia faz com que muitas informações quanto aos procedimentos desenvolvidos como, por exemplo, parâmetros de processamento, sejam omitidas por seus fabricantes provavelmente por conta dos interesses econômicos envolvidos. Por fim, foi feita a análise do desgaste do polietileno, uma vez que quando submetido a processos ortopédicos a longo prazo, há a necessidade de substituição deste material, havendo inúmeros esforços para que seja prolongada sua vida útil, pois mesmo precisando ser substituído em determinados intervalos de tempo, permanece sendo a melhor opção para próteses.*

Palavras-chave: *acabamento superficial, UHMWPE, torneamento, otimização.*

Abstract. *The present work had as main focus the review of the literature regarding the ideal machining conditions to obtain the best finish in turning of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Through this research, the main machining parameters are sought, to which it is possible to obtain the least roughness of the machined surface. In addition, the use of lubricooling during this process was analyzed so that the temperature generated during the process is not above those recommended for machining this polyethylene. Although there is an extensive research on UHMWPE, the fact that it is a material with high applicability in arthroplasty means that much information about the procedures developed, for example, processing parameters, are omitted by its manufacturers, probably due to economic interests involved. Finally, an analysis of the wear of this material was made, since when subjected to long-term orthopedic processes, there is a need to replace this material, with countless efforts to prolong its useful life, even though it needs to be replaced in certain time intervals, remains the best option for prostheses.*

Keywords: *surface finish, UHMWPE, turning, optimization.*

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros são amplamente utilizados em diversos setores da Engenharia. Sua versatilidade na indústria e centros de acadêmicos é muito apreciada graças à possibilidade para produzir objetos com geometria complexa. Soma-se a isso excelentes propriedades mecânicas como leveza e alta resistência mecânica, tornando-os fundamentais em inúmeras áreas de pesquisa e desenvolvimento [Ebewele, 2000].

No processo de usinagem de materiais poliméricos, a qualidade superficial está diretamente relacionada com os parâmetros do processo, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Quando polímeros são submetidos a processos de usinagem, é preciso que haja cuidado quanto aos parâmetros adotados, uma vez que problemas com a elevação da temperatura pode gerar problemas na superfície da peça e na remoção do material durante o processo de torneamento. A precisão dimensional e o acabamento superficial (textura) são os principais requisitos desejáveis no torneamento de materiais plásticos. Assim, é fundamental a análise de parâmetros para que seja possível obter esta condição [Gupta, 2013; Quadrini et al., 2007].

O polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) é um termoplástico de engenharia com excelentes propriedades físicas, químicas e mecânicas tais como inércia química, autolubrificação, resistência ao impacto e resistência à abrasão quando comparado a outros polímeros [Stein, 1999]. Assim, o UHMWPE encaixa-se perfeitamente nisso, uma vez que suas propriedades, embora muito vantajosas, requerem um estudo prévio aprofundado antes da realização de um processo mecânico de remoção de material. O UHMWPE é extremamente resistente a diversas substâncias e é quase que totalmente inerte; portanto, pode ser utilizado em ambientes mais agressivos ou corrosivos em temperaturas moderadas. Mesmo em temperaturas elevadas, o UHMWPE é resistente a vários solventes, exceto hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, e materiais altamente oxidantes [Braskem, 2018]. Além disso, por ser biocompatível e apresentar boas resistências química e mecânica, o UHMWPE tem sido usado em aplicações médicas, em especial, próteses ortopédicas de juntas totais ou parciais, com resultados clínicos satisfatórios [Coutinho, 2003]. Destarte, o acabamento da superfície usinada é um parâmetro que deve ser fortemente considerado. De acordo com Mesquita (1992), acabamento é um termo coloquial largamente usado para designar a qualidade geral de uma superfície usinada. Assim, o objetivo da usinagem é obter uma superfície técnica que apresente fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) apropriados, a fim de garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado, principalmente quando vidas humanas estão em jogo.

Durante a retirada do material ocorre uma geração de calor, ocasionado pelo atrito existente no contato da ferramenta com a peça e o cavaco, podendo interferir na qualidade da peça usinada. Ademais, pode alterar as dimensões da peça ocasionado pela dilatação térmica. Para evitar esses problemas com a ferramenta de corte e com a peça, a diminuição desse calor gerado por meio da utilização de fluidos de corte é necessária [Lisboa et al. 2013]. Ao usinar polímeros, alguns pontos devem ser considerados, como a expansão térmica que é dez vezes maior que a dos metais, a dificuldade da perda de calor (baixo calor específico), a baixa temperatura de amolecimento e fusão quando comparados aos metais, e ao fato dos polímeros serem muito mais elásticos [Mitsubishi, 2020]. Além de refrigeração e lubrificação do processo de usinagem, o fluido de corte também é responsável pela retirada do cavaco da zona de corte, promovendo assim, quando aplicado corretamente, uma maximização nos resultados, aumento na segurança do processo, melhorando o desempenho da ferramenta e a qualidade da peça [Sandvik, 2008].

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura acerca da influência dos parâmetros de entrada e do meio de arrefecimento sobre o acabamento gerado no torneamento do polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).

utilizado, o UHMWPE mantém suas propriedades de resistência ao impacto e inércia química. Além disso, é um material extremamente resistente quando exposto a produtos químicos, sendo totalmente inerte e por isso pode ser utilizado em ambientes corrosivos. Em temperaturas elevadas só é atacado por solvente aromáticos, halogêneos e oxidantes fortes (ex. ácido nítrico). Assim, pode ser utilizado na indústria petrolífera e ambiente marítimos [Polialden, 1998].

Este polietileno tem sido considerado como o “material padrão de ouro” utilizado em aplicações de artroplastia graças à inércia química, biológica e resistência ao desgaste, que são propriedades excelentes quando comparadas a outros polímeros bioestáveis, como o polietileno de alta densidade (HDPE – *High-Density Polyethylene*). Assim, são usados em próteses articulares internas de joelho-junta e quadril, pois o material é totalmente inerte, biocompatível e não provoca reações adversas no organismo [Baena et al., 2015]. A Figura 2 ilustra a aplicação do UHMWPE em prótese artificial de quadril. Apesar de boas propriedades mecânicas e tribológicas do UHMWPE, o desgaste ainda é o principal motivo de falha, afetando o desempenho a longo prazo de próteses [Bhatt, 2008]. Durante o desgaste, partículas de UHMWPE são liberadas nos tecidos adjacentes e, mesmo sendo um material biocompatível, as pequenas dimensões dessas partículas ativam o sistema imunológico do corpo, desencadeando reações inflamatórias [Gowland, 2014].

Figura 2 – Aplicação do UHMWPE em prótese artificial de quadril.



Fonte: Adaptado de Sharma (2005)

O polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) tem sido utilizado em aplicações biomédicas há cerca de 50 anos, graças à sua estabilidade química e suas propriedades tribológicas e mecânicas [Kurtz, 2016; Li, 2001]. Outras aplicações significativas incluem áreas como engenharia química, eletrônica, indústria de mineração e transporte [Barron, 2008] envolvendo aplicações em forros para caminhões basculantes, para-choques e tapumes de navios, canos para escoamento de gás e esgotos dentre outras [Kurtz, 2016]. Assim, devido a sua aplicabilidade nas mais diversas áreas o nível requerido no acabamento superficial a este polietileno é muito elevado.

3 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE USINADA

A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície [Machado et al., 2015]. Assim, o termo acabamento é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de alterações superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) sofridas por ela.

O raio de ponta das ferramentas cortantes de usinagem afeta o acabamento superficial das peças e na resistência da aresta de corte da própria ferramenta. Assim, quanto maior for o raio de ponta da

ferramenta, maior será sua resistência mecânica e conseqüentemente menor será a rugosidade das peças; contudo, há um limite, uma vez que raios muito elevados podem aumentar a vibração durante o processo prejudicando o acabamento das peças usinadas [Machado et al., 2015].

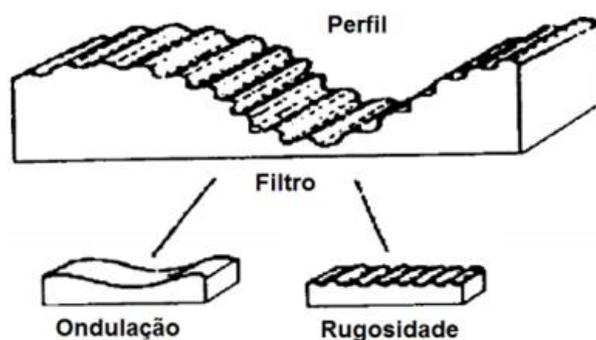
A qualidade do acabamento proveniente da usinagem do UHMWPE depende da velocidade de corte, do avanço e da ferramenta de corte (geometria e afiação), empregando os mesmos equipamentos e ferramentas usados para madeira e metal. Este PE pode ser facilmente torneado, fresado, aplainado, serrado e furado. Ferramentas de aço-rápido apresentam bons resultados; no entanto, as de metal-duro proporcionam um corte mais limpo e necessitam menos afiação (ou substituição), sendo estas mais econômicas a longo prazo. Para baixas velocidades de corte, a refrigeração não é necessária; para altas velocidades, recomenda-se ar comprimido ou fluido de corte emulsionável [Polialden, 1998].

Os polímeros diferem dos metais durante o seu processo de usinagem de acordo com a temperatura de transição vítrea (T_G). Pesquisadores apontam que a T_G é um parâmetro tão fundamental quanto a rugosidade da superfície torneada, pois está diretamente ligada aos parâmetros de corte utilizados e à formação do cavaco. Quando as condições de corte resultam em uma temperatura abaixo de T_G , a formação do cavaco ocorre por fratura frágil, prejudicando a textura da superfície usinada; entretanto, quando a T_G é ultrapassada, a formação do cavaco ocorre em regime dúctil, melhorando assim a textura [Aldwell et al., 2014; Ghosh et al., 2008].

3.1 Textura

A textura de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidades, ondulações, marcas e falhas [Klocke, 2011]. A Figura 3 ilustra a rugosidade e as ondulações de em uma peça. A exigência de textura de um determinado componente deve estar prevista em projeto; por exemplo, a superfície de um calibrador deve ser bem lisa, ao passo que a superfície de um disco de freio deve ser bastante rugosa [Machado et al., 2015].

Figura 3 – Perfil da peça ilustrando rugosidade e ondulação



Fonte: Adaptado de Palma (2006)

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos e suas variáveis estão relacionadas com a precisão de ajuste da máquina, condições de usinagem e tolerância de fabricação [Kopac e Bahor, 1999]. A rugosidade pode ser definida como uma espécie de erro microgeométrico presente na superfície de uma determinada peça que não pode ser medida com equipamentos convencionais. Sendo assim, para que seja possível mensurar tais saliências e reentrâncias é necessário um equipamento eletrônico, como o rugosímetro. Os rugosímetros podem ser eletromecânicos, ópticos e a laser. Eles diferenciam-se por conta do tipo de sensor de medição, que podem ser apalpadores, feixe de luz ou elétrons, respectivamente [Novaski, 1994]. Nos rugosímetros eletromecânicos, um apalpador com ponta de diamante faz a varredura da superfície

fornecendo o perfil de rugosidade, caracterizando esta medição com contato, comumente utilizada na indústria [Chand et al., 2011; Novaski, 1994].

Os parâmetros da rugosidade (textura primária) são definidos a partir do conceito da linha média, que por sua vez, define três grupo de parâmetros geométricos que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade [Agostinho et al., 1977]. Diversas organizações, como ISO, DIN e JIS, possuem normas técnicas para a avaliação da rugosidade de superfícies técnicas. A Tabela 1, apresenta alguns parâmetros de amplitude empregados na quantificação da rugosidade.

Tabela 1 – Alguns parâmetros de rugosidade.

| Símbolo | Nome | Descrição |
|---------|-------------------------|--|
| R_a | Desvio aritmético médio | Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação (l_m). |
| R_q | Desvio médio quadrático | Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de avaliação (l_m). |
| R_z | Desvio médio parcial | Média aritmética das n maiores amplitudes pico/vale detectadas em cada comprimento de amostragem (l_e), considerando $l_m = n \cdot l_e$. |
| R_y | Altura máxima do perfil | Maior amplitude pico/vale do perfil detectado dentre todos os comprimentos de amostragem (l_e) |
| R_t | Altura total do perfil | Soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação (l_m). |

Fonte; Adaptado de Machado et al. (2015)

Dentre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o R_a . Conhecido também por rugosidade média, é amplamente empregado como parâmetro de controle de processos industriais e está disponível em praticamente todos os instrumentos de medição de rugosidade. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe a influência de efeitos ocasionais. Embora bastante vantajoso, R_a , isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes na superfície técnica [Mesquita, 1992].

Ondulações ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que a sua amplitude, ela surge a partir de imprecisões de movimento dos equipamentos [Palma, 2006]. Já marcas e falhas são consequências deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça e se encontra superposta ao perfil de ondulação [Agostinho et al., 1977]. Normalmente, ondulações, marcas e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros macrogeométricos. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada [Machado et al., 2015].

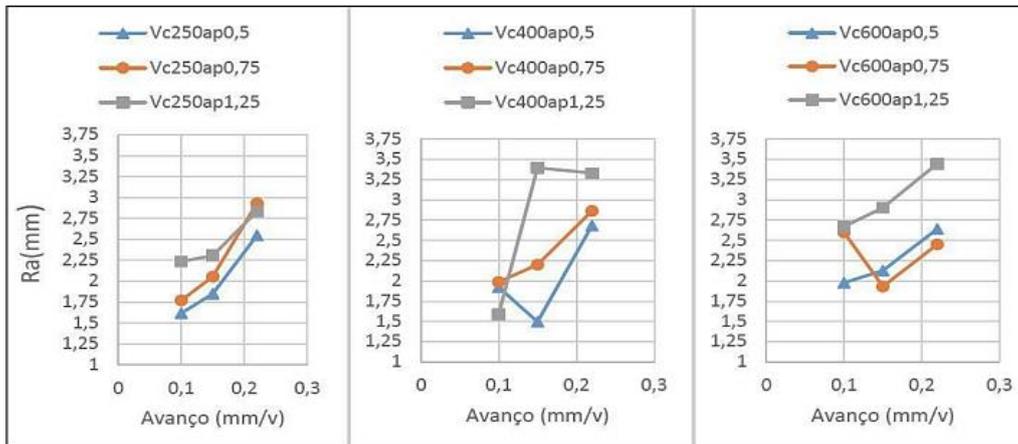
A usinagem de polímeros tem sido crescentemente utilizada e tem se tornado necessária quando a quantidade de peças produzidas não justifica o custo de usinagem com ferramenta para moldes ou extrusão por matriz, ou quando é necessário um produto com alta exatidão dimensional, como por exemplo, lentes poliméricas [Zhang et al., 2012].

Os parâmetros de corte são imprescindíveis para a obtenção de uma boa textura na superfície usinada. Assim, estudos sobre a influência desses no acabamento têm sido desenvolvidos.

Dias et al. (2017) analisaram a influência do avanço (f) em relação à rugosidade média (R_a) para diferentes condições de corte no torneamento de uma amostra de UHMWPE com 71 mm de diâmetro e 18 mm de comprimento. Os autores concluíram que o aumento do avanço promove um aumento dos valores de R_a para diferentes níveis de velocidade de corte (v_c) (Fig. 4). Os resultados obtidos pelos autores são análogos aos reportados por outros autores [Kaddeche et al., 2012; Salles e Gonçalves, 2003]. Vale ressaltar que os valores de R_a encontrados ($2,366 \pm 0,564 \mu\text{m}$) podem ser

considerados elevados dependendo da área de aplicação. Na área de artroplastia, por exemplo, a rugosidade das superfícies em contato afeta muito o desgaste das próteses. Nesses casos, a rugosidade desejável, situa-se na faixa de um vigésimo a um décimo dos valores obtidos neste experimento.

Figura 4 – Variação da rugosidade para diferentes condições de corte do UHMWPE.



Fonte: Dias et al. (2017)

Sabe-se, que a rugosidade da superfície polimérica é função da rotação n (ou velocidade de corte v_c), velocidade de avanço ($v_f = f \cdot n$) e profundidade de corte (a_p). Estima-se que os melhores níveis para obter um bom acabamento estejam nas faixas de $3500 < n < 12000$ rpm, $0,05 < a_p < 1,0$ mm e $v_f = 510$ mm/min [Kurtz, 2016; Song et al., 1999].

Velocidades de corte maiores produzem danos na camada superficial do polietileno, provocando redução na cristalinidade e menores resistências ao desgaste. Contudo, maiores velocidades de corte também resultam menores rugosidades na superfície do polímero quando a velocidade de avanço é mantida constante [Song et al., 1999].

A geometria da ferramenta de corte desempenha um papel muito importante na temperatura da peça e, portanto, na rugosidade da superfície. Há um consenso por parte dos pesquisadores que os melhores resultados obtidos na usinagem de polímeros podem ser atribuídos principalmente ao uso de ferramentas personalizadas [Chabbi et al., 2017; Jagtap e Mandave, 2015].

Polialden (1998) recomenda a utilização de ferramenta de corte de aço-rápido com aresta bem afiada, ângulo de saída positivo (5 a 30°), velocidades de corte (v_c) entre 200 e 400 m/min e avanços (f) entre $0,1$ e $0,5$ mm/volta. O fabricante sugere ainda o corte a seco na usinagem com baixos níveis de v_c . Debra, (1984) explica que o acréscimo de v_c gera calor, o qual aumenta a temperatura na zona de corte, aumentando também a mobilidade das moléculas de longo alcance do material, reduzindo, portanto, o limite de resistência à tração ou o esforço de tensão cisalhante.

Costa et al. (2019) encontraram bons resultados de acabamento no torneamento do UHMWPE utilizando ferramenta de metal-duro. Os autores concluíram que a menor rugosidade foi obtida para um avanço (f) de $0,10$ mm/rev, embora a melhor estabilidade do processo para a textura gerada tenha sido alcançada para $f = 0,22$ mm/rev. Além disso, foi constatada baixa usinabilidade do material. Em relação à velocidade de corte, foi utilizado $v_c = 600$ m/min. Concluíram que para este nível de v_c a estrutura molecular do UHMWPE foi afetada, possivelmente devido à oxidação e às condições severas do corte. Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados por outros autores na usinagem de outros polímeros [Fetecau, 2008; Rubio et al., 2015].

Salles e Gonçalves (2003) apresentaram o estudo do acabamento no torneamento do UHMWPE avaliando a rugosidade média (R_a) e a imagem da superfície usinada. Citam que a usinabilidade do UHMWPE é semelhante à observada no torneamento de alumínio e madeira. Notaram uma grande

influência do avanço e pouca influência da velocidade de corte sobre R_a . As imagens apresentaram claramente as marcas de avanço, bem como fraturas em condições extremas. Ademais, em todas as condições, o cavaco gerado foi do tipo contínuo, mostrando que isso não afetou o acabamento.

Devido à elevada aplicabilidade do UHMWPE nas mais diversas áreas, a rugosidade é de suma importância; como exemplo, é possível citar sua aplicação na indústria com a função de junta. Para reduzir o atrito e o desgaste no componente polimérico, a textura da superfície tem a função de reter o fluido e promover a lubrificação na junta. Assim, a textura influencia o desempenho tribológico em rolamentos deslizantes devido à capacidade de controlar a área de contato da superfície, aumentando assim a pressão hidrodinâmica, arraste do fluido e reduzindo o desgaste [Ippolito et al., 2017].

O UHMWPE não é influenciado apenas pelas propriedades mecânicas e físicas, mas também por condições tribológicas como carga, temperatura e lubrificação [Stachowiak e Batchelor, 2014].

3.2 Atrito e Desgaste

O UHMWPE é aplicado especialmente em peças de máquinas sujeitas ao desgaste, como rolamentos, engrenagens ou guia de corrente [Carl, 1995]. Além disso, Barron (2008) afirma que a escolha deste material para estudo é de suma importância, principalmente por conta da sua utilização como superfície de apoio em articulações artificiais, onde implantes deste tipo ultrapassam bem mais de um milhão de casos por ano, somente no Brasil. É consenso por parte de diversos autores que há inúmeras dificuldades a serem superadas. Vários estudos relatam a importância do estudo dos aspectos tribológicos, para que seja possível aumentar a vida útil do material, reduzindo assim a sua taxa de desgaste [Huang et al., 2013; Atwood et al., 2011].

Estudos indicam que a resistência ao desgaste de um polímero está principalmente relacionada às suas propriedades mecânicas que, por sua vez, relacionam-se com a morfologia física do polímero (cristalinidade) [Sperling, 2006]. De acordo com Kurtz (2016), um aumento na cristalinidade do UHMWPE acarreta uma elevação na resistência ao escoamento e no módulo de elasticidade.

Song et al. (1999) realizaram um estudo sobre os efeitos da usinagem nas propriedades tribológicas do UHMWPE em relação ao coeficiente de fricção e à taxa de desgaste do material (variáveis de resposta). Além disso, foi analisada a influência da velocidade de corte (v_c), da velocidade de avanço (v_f) e da profundidade de corte (a_p) na rugosidade da superfície usinada. Para a análise tribológica foi utilizado um dispositivo do tipo pino-disco na realização dos testes: enquanto os pinos eram metálicos, os discos eram de UHMWPE. Concluíram que:

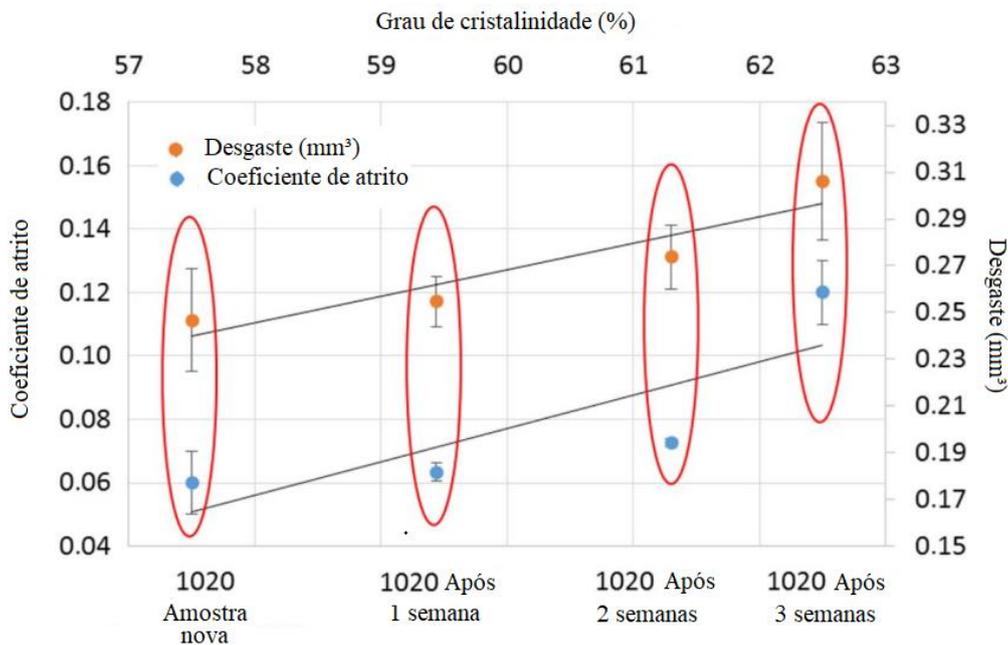
- A taxa de desgaste do UHMWPE diminuiu quando v_c aumentou, fixando v_f e a_p em 8,47 mm/s e 0,203 mm, respectivamente.
- A taxa de desgaste aumentou com o crescimento de v_c ao passo que a temperatura de fusão diminuiu quando v_c foi reduzida. Além disso, houve uma piora na textura na superfície com a elevação de v_c .
- A taxa de desgaste e a rugosidade da superfície mostraram a mesma tendência com o aumento de a_p . Quando $a_p < 0,127$ mm, ambas diminuíram com o aumento de a_p . Com $0,127 \text{ mm} < a_p < 500$ mm, as mesmas aumentaram com o incremento de a_p . Para $a_p > 500$ mm, tais variáveis permaneceram constantes com a elevação de a_p . Assim, obtiveram um valor ótimo para as variáveis de resposta com $a_p = 0,127$ mm nas condições estudadas.

Além do desgaste propriamente dito, outro aspecto que é preciso analisar quanto ao polímero é investigar como as suas propriedades se comportam e são alteradas com o envelhecimento do material. Métodos de envelhecimento têm sido estudadas de maneira intensa; contudo, ainda está em estágio inicial, pois diversas questões referentes às propriedades tribológicas não foram compreendidas [Kurtz, 2016; Li, 2001].

Petrica et al. (2015) fizeram investigações buscando compreender o comportamento do desgaste tribológico do UHMWPE em determinados ciclos de vida. ou seja, a relação existente para este

polietileno para uma amostra nova comparativamente a uma amostra envelhecida de modo acelerado descrito pela Norma ASTM F2003-00. A influência do envelhecimento no coeficiente de atrito e desgaste é representado pela Figura 5, que evidencia a interdependência entre os três parâmetros (atrito, desgaste e grau de cristalinidade) para as condições tribológicas analisadas. No caso, após a primeira semana de envelhecimento acelerado, ocorreu um aumento de 3% na cristalinidade acarretando um crescimento de 4% no desgaste e 5% no atrito; para a segunda semana, a cristalinidade cresceu 6%, enquanto o desgaste e o atrito tiveram um aumento de 12 e 20%, respectivamente; por fim, após a terceira semana, o grau de cristalinidade foi 8% maior, causando um crescimento de 25% no desgaste e 108% no atrito.

Figura 5 – Influência do envelhecimento no coeficiente de atrito e desgaste.



Fonte: Adaptado de Petrica et al. (2015)

Assim, as principais conclusões foram:

- O aumento no grau de cristalinidade foi considerado um fator importante, pois influencia o coeficiente de atrito e, portanto, o desenvolvimento do desgaste.
- O coeficiente de atrito encontrado foi mais do que o dobro para as amostras envelhecidas durante três semanas em comparação a amostras novas. Isso ocorreu devido à fragilização da superfície causada pelas alterações morfológicas induzidas pelo envelhecimento.
- Aplicando o método de envelhecimento acelerado descrito pela Norma ASTM F2003-00, o grau de cristalinidade foi aumentado em 8%, mas nenhum aumento substancial na oxidação foi observado. Por conta disso, o método de envelhecimento utilizado pode ser necessário para quantificar também o comportamento oxidativo da amostra.

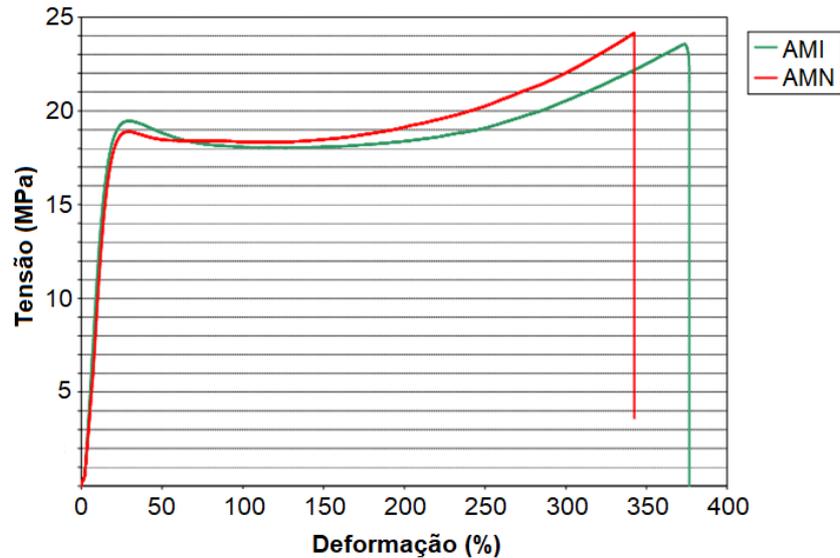
Quanto ao mecanismo de desgaste relativo à idade do material, os autores observaram a presença de resíduos que se deformaram plasticamente após 85000 ciclos para as amostras que foram envelhecidas, enquanto que as amostras novas apresentaram apenas leves arranhões na superfície.

Fouad et al. (2005) realizaram um procedimento experimental em 15 amostras e constataram um aumento na microdureza e grau de cristalinidade devido ao aumento da temperatura e da duração do pré-tratamento térmico do UHMWPE.

Rocha e Mansur (2007) caracterizaram e compararam duas amostras [AMN produzida no Brasil e AMI no exterior] de UHMWPE utilizando espectroscopia de infravermelho. Observaram que as

amostras apresentaram graus semelhantes de cristalinidade e pequenas diferenças de oxidação. Além disso, as propriedades mecânicas do material foram analisadas. A Figura 6 ilustra o comportamento mecânico similar para ambas amostras, típicas de polímeros semicristalinos como o UHMWPE, capaz de suportar grandes deformações e obter boa plasticidade. A análise do gráfico mostra que para a AMI, o módulo de elasticidade foi 12% maior, o alongamento até a ruptura e a tenacidade foram superiores em 10%, e a tensão de ruptura foi 8% menor. Tanto o limite de escoamento quanto a tensão máxima foram similares para ambos.

Figura 6 – Curva de tensão-deformação típicas para AMI (verde) e AMN (vermelho).



Fonte: Adaptado de Rocha e Mansur (2007)

Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, com exceção dos valores encontrados para o limite de escoamento das amostras AMN e AMI (13,0 e 13,7 MPa, respectivamente), onde o valor da tensão verdadeira de tração para o UHMWPE é 23,0 MPa [Kurtz, 2016]. Além disso, o módulo de Young e o limite de escoamento aumentam com o tempo e com a temperatura de pré-aquecimento, sendo que essas melhorias nas propriedades mecânicas do material podem ser explicadas pelas mudanças no tamanho do cristal e no grau de cristalinidade [Fouad, et al., 2005].

3.3 Influência dos Meios Lubrificadorantes

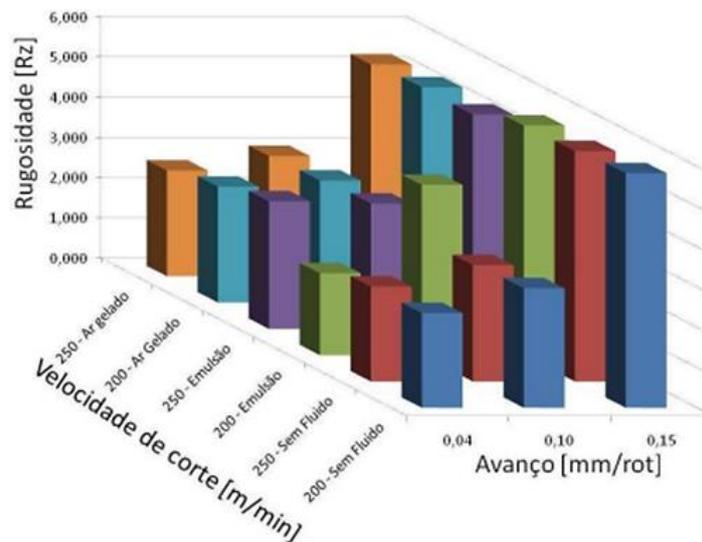
A temperatura de transição vítrea (T_G) é uma propriedade determinante da usinabilidade dos polímeros, como citado anteriormente. A estrutura dos materiais poliméricos varia de acordo com a (T_G). Abaixo dela, a estrutura é rígida (vítrea). A usinagem nessa região é mais difícil e a rugosidade tende a ser mais alta. Um pouco acima dessa temperatura, denominada por “escoamento frio”, a usinagem é favorável, e uma rugosidade menor pode ser obtida. Se a temperatura continuar a subir, o material vai atingir um estado “pastoso”, e a superfície usinada apresentará uma textura com elevada ondulação e aparência de arrancamento [Ghosh et al., 2008; Polialden, 1998]. Assim, é imprescindível que haja um controle rigoroso da temperatura durante o processo de usinagem em polímeros com a utilização de meios lubrificantes.

O polietileno UHMWPE apresenta ponto de fusão de 130°C, enquanto sua temperatura máxima de serviço recomendável é 93°C em virtude de seu elevado coeficiente de expansão térmica. Uma vez que seja preciso utilizar meios lubrificantes, para conter o aumento da temperatura, deve-se

analisar a afinidade química, pois caso contrário, pode haver degradação do polímero em virtude do lubrificante utilizado [Salles e Gonçalves, 2003].

Maciel et al. (2010) realizaram um estudo sobre a usinabilidade de três tipos de polímeros utilizando diferentes configurações de parâmetros e com a utilização de ar gelado como sistema de arrefecimento em comparação à usinagem a seco e com fluido de corte emulsificável, considerando a rugosidade média parcial (R_z) como variável de resposta. A Figura 7 mostra um resumo dos valores obtidos para rugosidade para as diferentes configurações entre parâmetros de usinagem e meio lubrificante.

Figura 7 – Resultados dos valores médios de R_z em relação aos parâmetros adotados.



Fonte: Maciel et al. (2010)

Os autores chegaram as seguintes conclusões:

- A utilização do ar gelado na usinagem de materiais poliméricos estudados [Poliacetil (POM), Poliamida 6 (Nylon 6) e Polipropileno (PP)], não demonstrou uma eficiência significativa que justifique a substituição do fluido de corte emulsificável, a não ser quando são consideradas as condições ambientais.
- A rugosidade média parcial (R_z) não sofreu influência significativa dos sistemas de refrigeração empregados.

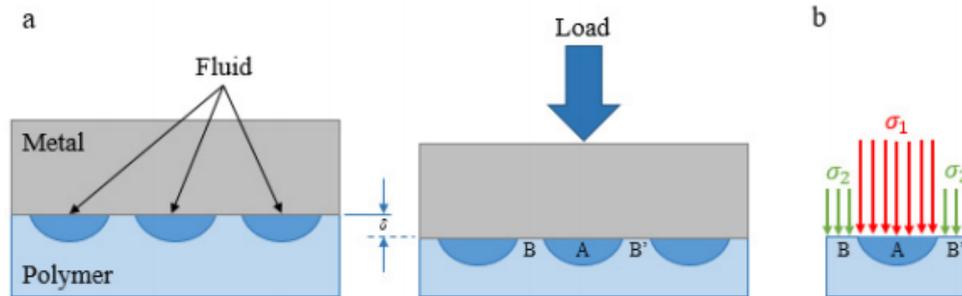
Maiores informações quanto aos fluidos de corte ideais para procedimentos com o UHMWPE não foram encontrados na literatura. Acredita-se que muito por conta da utilização deste material na artroplastia, uma vez que interesses econômicos por parte dos fabricantes sejam o grande empecilho para a obtenção de maiores informações sobre o assunto.

Em uma simulação ortopédica, uma redução significativa no atrito e desgaste é observada quando microcavidades de 1 μm de diâmetro são texturizadas na superfície do UHMWPE utilizado em próteses para quadril [Sawano et al., 2009]. Kustandi et al. (2010) realizaram a texturização do UHMWPE através da litografia de nano-implante produzindo linhas paralelas na superfície do polietileno com espaçamento de 1 μm . Constataram uma redução de 35% no coeficiente de atrito seco com uma contraface de cerâmica.

Clarke (1971) aplicou texturas na superfície do UHMWPE e realizou experimentos com uma contraface de metal. O resultado mostrou uma redução no coeficiente de atrito de 64 a 86% utilizando lubrificação. A Figura 8 representa a textura da superfície utilizada. Sob condições estáticas, as microcavidades na superfície arrastam o fluido para dentro delas de modo que, quando ocorre um

carregamento na superfície, a tensão no fluido σ_1 (entre fluido e metal) seja maior que a tensão de contato do polímero σ_2 (entre polímero e metal). Este fenômeno é conhecido como proteção contra tensões, sendo uma maneira de reduzir o desgaste do polietileno.

Figura 8 – Modelo de textura aplicado para contato entre polímero e metal.



Fonte: Clarke (1971)

4 CONCLUSÕES

A rugosidade da superfície gerada na usinagem do polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) sofre grande influência do tipo de ferramenta e dos parâmetros de corte. Com a utilização correta de ambos, é possível obter um excelente acabamento no torneamento deste PE. Assim, a revisão da literatura permitiu concluir que:

- O comportamento do material estudado em relação aos parâmetros de torneamento, que permitem obter as melhores condições de acabamento da superfície usinada são bem próximo dos materiais metálicos, sendo influenciado, em uma primeira avaliação, pelo avanço (f) e posteriormente pela velocidade de corte (v_c).
- O avanço é o parâmetro mais influente na rugosidade superficial das peças; as alturas dos picos e as profundidades dos vales provocadas pelas marcas de avanço da ferramenta de corte crescem em proporção quadrática ao avanço.
- As condições ideais de usinagem que proporcionam os melhores acabamentos devem ser baseadas nas propriedades dos polímeros, tais como temperatura de transição vítrea e mobilidade molecular. Para minimizar a rugosidade da superfície usinada, os parâmetros de corte devem ser relacionados de modo que não ocorra deformação plástica.
- Um dos principais mecanismos de desgaste do UHMWPE é a fadiga.
- O processo de envelhecimento influencia a morfologia do material. A superfície torna-se quebradiça, favorecendo o aparecimento de fissuras e restos de material, que ocasionam o aumento do desgaste.
- O processo de pré-tratamento térmico leva a um aumento do grau de cristalinidade do UHMWPE. Esse crescimento, que está relacionado tanto à temperatura quanto ao tempo de tratamento térmico, afeta fortemente as propriedades mecânicas do material.
- A texturização na superfície do UHMWPE: i) reduz o coeficiente de atrito e conseqüentemente o desgaste; ii) melhora as condições tribológicas na transição entre as fases de movimento e pausa quando submetido a condições de carregamento; iii) Reduz a pressão no polímero.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões.** 3 ed., Blucher, São Paulo, 1997.

ALDWELL, B.; HANLEYR, A.; e O'DONNELL, G. E. “**Characterising the machining of biomedical grade polymers**” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* **228** 1237-1251, (2014). <https://doi.org/10.1177/0954405413514956>

ATWOOD, S. A.; VAN, D.W; PATTEN, E.W.; FURMANSKI J.; RIES, M. D.; PRUITT L.A. “Tradeoffs amongst fatigue, wear, and oxidation resistance of cross-linked ultra-high molecular weight polyethylene”. **J Mech Behav Biomed Mater**, Vol. 4, pp. 1033-1045. (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.03.012>

BAENA, J. C.; WU, J.; PENG, Z. “Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications” **A Review. Lubricants**, Vol. 3, No. 2, pp. 413–436, (2015). <https://doi.org/10.3390/lubricants3020413>

BARRON, D. C. “Ultra-high molecular weight polyethylene – evidence for a three-phase morphology”. **Polymer**, Vol. 49 pp. 3111-3115, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.05.004>

BHATT, H. & GOSWAMI, T. “Implant wear mechanisms--basic approach. ” **Biomed. Mater.** Vol. 3, No. 7, pp. 1–9 (2008). <https://doi:10.1088/1748-6041/3/4/042001>

BRASKEM. “**Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE.**” Boletim técnico, (2018).

CARL, H. V. “**Zur Anwendung verschiedener Kunststoffe zur Herstellung von individuellen Aufbisschienen**”. Vol. 5. (1995) Disponível em: <<https://d-nb.info/990832430/34>>

CHABBI, A., YALLESE M. A., MEDDOUR, I., NOUJOUA, M., MABROUKI, T. and GIRARDIN, F “Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function” **Measurement** Vol. 95 pp. 99–115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.043>

CHAND, M., MEHTA, A., SHARMA, R., OJHA, V.N., CHAUDHARY, K.P. “Roughness Measurement Using Optical Profiler with Self-Reference Laser and Stylus Instrument — A Comparative Study.”. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, Vol. 49 pp. 335–339, 2011. ISSN: 0975-1041

CLARKE, I.C. “Human articular surface contours and related surface depression frequency studies”. **Ann Rheum Dis**, Vol. 3, pp. 1-15, 1971. <http://dx.doi.org/10.1136/ard.30.1.15>

COSTA, D. D.; CORRÊA, H. L.; REBEYKA, C. J.; ZAWADZKI, S. F.; “UHMWPE molecular structure analysis after turning operations and machinability with a standard off-the-shelf carbide tool” **Eng. Res. Express**, Vol. 1 pp. 27. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ab5894>

COUTINHO, F.M.B.; MELLO, I.L.; MARIA, L.C.S. “**Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações.**” *Polímeros*. V.13, p.1-13, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/po/v13n1/15064> Acesso em: 15/04/2021.

DEBRA, D.B. “Design of laminar flow restrictors for damping pneumatic vibration isolators.” **CIRP Annals**, Vol. 33, pp. 351-361. 1984. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61441-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61441-3)

DIAS, D. C.; NOGUEIRA, J. A.; ARRUDA, S. A. “AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE)” **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, Santa Catarina, Brasil, março 2017. Disponível em: http://www.labusig.ufpr.br/projetos/cobef2017_uhmwpe.pdf

EBEWELE, O., “**Polymer Science and Technology**”, CRC Press, Boca Raton, FL, (2000).

FETECAU, C. “Machining and surface integrity of polymeric materials“ **Int. J. Mater. Form.** Vol. 1, pp. 8, 2008. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0192-z>

FOUAD, A., MOURAD H. I., BARTON, D. C. “Effect of pre-heat treatment on the static and dynamic thermo-mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene”, **Polymer Testing** Vol. 24, pp. 549-556. (2005). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.02.007>

GHOSH, R.; KNOPF, J. A.; GIBSON D. J.; MEBRAHTU, T.; CURRIE, G. “Cryogenic machining of polymeric biomaterials: a case study of intraocular lens Medical Device Materials IV: Materials and Processes for Medical Devices” **Conf. ASM Mat. & Process. For Med. Dev.** Palm Desert, CA, Estados Unidos da América, 23 de setembro de 2008 a 25 de setembro de 2008. pp 54-64. 2008. <http://dx.doi.org/10.1361/cp2007mpmd054>

GOWLAND, N. J. “**The Wear and Biological Activity of Antioxidant UHMWPE for use in Total Hip Replacements.**” PhD thesis, The University of Leeds, 2014. Disponível em: <http://etheses.whiterose.ac.uk/8151/>

GUPTA, B.” Multi-objective optimization of cutting parameters in turning using grey relational analysis,” **Int. J. of Ind. Eng. Comp.**, Vol. 4, No. 2, pp. 547–558, 2013. <http://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.06.001>

HUANG, J. S.; WANG, J.; YANG, D.; DUAN, K.; WENG, J. “Reciprocating sliding wear behavior of alendronate sodium-loaded UHMWPE under different tribological conditions”. **Mater. Sci. Eng.: C**, Vol. 33, No. 6, pp. 3001-3009. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.03.030>

IPPOLITO, C.; YU, S.; LAI, Y. J.; BRYANT, T. “Process parameter optimization for hot embossing uniformly textured UHMWPE surfaces for orthopedic bearings”. **Procedia CIRP**, Vol. 65, pp. 163-167, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.04.039>.

JAGTAP, T. U.; MANDAVE, H. A. “Machining of plastics: A review” **Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.** Vol. 3, No. 4, pp. 577–581, (2015). ISSN 2091-2730

KADDECHE, M.; CHAOUI, K.; YALLESE, M. A. “Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins”, **Mechanics & Industry** Vol. 13, No. 05, pp. 307-316, 2012. <https://doi.org/10.1051/meca/2012029>

KLOCKE, F. “**Manufacturing Processes 1: Cutting.**” Londres: Editora Springer, 517p (2011). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36772-4>

KOPAC, J.; BAHOR, M. “Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product.” **J. Mater. Process. Technol.**, Vol.92-93, pp.381-387, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00239-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00239-3)

KURTZ, S. M. “Vitamin E-Blended UHMWPE Biomaterials”, **UHMWPE Biomaterials Handbook**, 3 ed. Oxford: Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35401-1.00017-X>

KUSTANDI, T.S.; CHOO, J.H.; LOW, H.Y.; SINHA, S.K. “Texturing of UHMWPE surface via NIL for low friction and wear properties” **J. Phys. D:Appl. Phys.** Vol. 43, No. 2, pp. 1-6, 2010. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/1/015301>

LI, S. “Ultra high molecular weight polyethylene: from charnley to cross-linked” **Oper. Tech Orthop.**, Vol. 11, No. 4, pp. 288-295, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1048-6666\(01\)80044-6](https://doi.org/10.1016/S1048-6666(01)80044-6).

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J. B.; HIRASHITA, M.A., “Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências”. **Anais do XXXIII ENEGEP**, Salvador, BA, out. 2013. Disponível em http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_185_056_23095.pdf.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3 ed., Blucher, São Paulo, 2015.

MACIEL D., LAURO. C. H., BRANDÃO L. C., “Usinagem de materiais poliméricos utilizando sistema de refrigeração com ar gelado”. **Anais do VI CONEM**, Campina Grande, PR, ago. 2010. Disponível em <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1936.pdf>.

MACROGALLERIA. “Department of Polymer Science. University of Souther Mississippi, 1997”, **The Chem. Educ.**, Vol. 4, pp. 38-39. <https://doi.org/10.1007/s00897990281a>

MANO, E. B. “**Polímeros como materiais de engenharia.**” 2 ed., Blucher, São Paulo, 1991.

MANO, E. B.; MENDES, L. C “**Introdução a polímeros.**” 4 ed., Blucher, São Paulo, 1999.

MESQUITA, N. G. M., “**Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação.**”. Florianópolis, Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 142p, 1992.Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/157742>

MITSUBISHI CHEMICAL ADVANCED MATERIALS. “**Manual para Usinagem de Plásticos.**” (2020) Acesso em: 16/04/2021. Disponível em: <https://www.mcam.com/pt-br/suporte/informacoes-usinagem-de-pecas/manual-para-usinagem-de-plasticos/#c198265..>

NOVASKI, O. “**Introdução à engenharia de fabricação mecânica.**” 2 ed., Blucher, São Paulo, 1994.

PALMA, E. S., “**Apostila de metrologia,**”. PUCMG, Belo Horizonte, (2006). Diponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/17889746/apostila-metrologia-puc-minas>

PETRICIA M.; DUSCHER, B.; KOCH, T.; ARCHODOULAKI, V.-M. “Tribological investigations on virgin and accelerated aged UHMWPE”. **Tribol. Int.**, Vol. 87, pp 151-159, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.02.024>.

POLIALDEN. **Boletim Técnico 3.01**. São Paulo, 1988. POLIALDEN. **Boletim técnico 4.04**. São Paulo, 1998.

QUADRINI, F.; SQUEO, E. A.; TAGLIAFERRI, V., “Machining of glass fiber reinforced polyamidell”, **Express Polymer Letters**, Vol. 1, No. 12, pp. 810-816, 2007. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.112>

RASTOGI, S.; KURELEC, L.; LEMSTRA, P. J. “Chain Mobility in Polymer Systems: On the Borderline between Solid and Melt. 2. Crystal Size Influence in Phase Transition and Sintering of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene via the Mobile Hexagonal Phase” **Macromolecules**, (1998). <https://doi.org/10.1021/ma980261h>

ROCHA M. F. G.; MANSUR H. S. “Caracterização microestrutural e espectroscópica do uhmwpe utilizado como polímero de suporte para prótese total de joelho”. **Anais do 9º CBPol**, São Carlos, SP, out. 2007. Disponível em <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2007/PDF/335.pdf>.

RUBIO J. C.; C, PANZERA, T. H.; SCARPA, F., “Machining behaviour of three high-performance engineering plastics”. **Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.**, Vol. 229, No. 1, pp. 28-37, 2015. <https://doi.org/10.1177/0954405414525142>.

SALLES, J. L. C.; GONÇALVES, M. T. T. “Effects of machining parameters on surface quality of the ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE)”. **Matéria (UFRJ)**, Vol. 8, No. 1, pp. 1-10, 2003. Disponível em <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10119/10119.pdf>.

SANDVIK, **Manual Técnico de Usinagem**. Sandvik Coromant, 2008.

SAWANO, H., WARISAWA, S., ISHIHARA, S. “Study on long life of artificial joints by investigating optimal sliding surface geometry for improvement in wear resistance”. **Precis. Eng.**, Vol. 33, No. 4, pp.492-498, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2009.01.005>.

SHARMA, K. G. **Easily Processable Ultra High Molecular Weight Polyethylene with Narrow Molecular Weight Distribution**. Ph.D. (Thesis) in Chemical Engineering and Chemistry, Technische Universiteit Eindhoven, 2005. <https://doi.org/10.6100/IR583519>.

SONG, J.; LIU, P.; CREMENS, M.; BONUTTI, P. “Effects of machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding”. **Wear**, Vol. 225-229, Part. 2, pp. 716-723, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00066-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00066-6).

SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 4 ed., Wiley, New Jersey, 2006. <https://doi.org/10.1002/0471757128>.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR A. W. **Engineering Tribology**. 4 ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>.

STEIN, H. L. **Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)**. Engineered Materials Handbook, Vol. 2 – Engineering Plastics, pp. 167-171, 1999. Disponível em: http://hipolymers.com.ar/pdfs/gur/aplicaciones/UHMWPE_ASM_99res72dpi.PDF.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. Artliber, São Paulo, 2005.

ZHANG, B.; HUANG, W.; WANG, X. “Biomimetic surface design for ultrahigh molecular weight polyethylene to improve the tribological properties”. **Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol.**, Vol. 226, No. 8, pp. 705-713, 2012. <https://doi.org/10.1177/1350650112437829>.

ANEXO 1

Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular PE-UAPM UTEC® 6540

| PROPRIEDADES FÍSICAS | MÉTODOS ASTM | UNIDADES | VALORES TÍPICOS |
|---|--------------|------------------------------------|------------------------|
| Peso Molecular Viscosimétrico | | g/mol | >6.0 x 10 ⁵ |
| Densidade (no moldado) | D-1505 | g/cm ³ | >0.93 |
| Densidade Aparente | D-1895 | g/cm ³ | >0.4 |
| Tamanho médio de partícula d ₅₀ | | µm | 120 - 220 |
| PROPRIEDADES MECÂNICAS | | | |
| Resistência à tração no escoamento | D-1708 | MPa | 25 |
| Resistência à tração na ruptura | D-1708 | MPa | 35 |
| Aalongamento final | D-1708 | % | >300 |
| Resistência ao impacto IZOD | D-256 | J/m | não quebra |
| Resistência ao impacto Charpy* | | KJ/m ² | >60 |
| Dureza Shore | D-2240 | Shore D | 63 |
| Resistência à abrasão | | mg/1000 ciclos | 23 |
| Desgaste por abrasão em lama de areia | | índice de abrasão (aço 1020 = 100) | 25 |
| Coeficiente de fricção | D-1894 | Estatico µe | 0,32 |
| | | Dinâmico µk | 0,26 |
| PROPRIEDADES TÉRMICAS | | | |
| Temperatura de fusão | D-3418 | °C | 133 |
| Temperatura de amolecimento VICAT | D-1525 | °C | 128 |
| Temperatura de deflexão térmica 0,45 MN/m 1,81 MN/m | D-648 | °C | 79 |
| | | | 48 |
| Condutividade térmica a 23°C | D-177 | W/m.K | 0,4 |
| Coeficiente de dilatação linear | D-696 | 10 ⁻⁶ /°C | 1,5 |
| Calor específico (23°C) | D-150 | cal/g°C | 0,48 |
| Entalpia específica de fusão | | cal/g | 34 |
| PROPRIEDADES ELÉTRICAS | | | |
| Resistência volumétrica | D-257 | ohm-cm | >10 ¹¹ |
| Resistência superficial | D-257 | ohm | >10 ¹¹ |
| Resistência dielétrica | D-149 | kV/cm | 900 |
| Constante dielétrica (10 ⁷ cps) | D-150 | - | 2,3 |
| Tangente dielétrica | D-150 | - | 2,3 x 10 ⁻⁴ |
| OUTRAS PROPRIEDADES | | | |
| Absorção de água | D-570 | % | 0,01 |

*Determinação com corpos de prova de espessura de 15 mm, de acordo com a norma ISO - PD 5 11542-2



POLIADEN PETROQUÍMICA S.A.

Rua Geraldo Flausino Gomes, 61 - 2º andar - Brooklin Novo - São Paulo - SP - CEP 04575-060
 Telefone: (+5511) 5505-3166 - Fax: (+5511) 5505-2595

JUN 99

UTEC® 6540