



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Gabriela Simão de Myron Cardoso

**Avaliação da perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo usinagem por
fluxo abrasivo de matrizes e punções**

Florianópolis
2024

Gabriela Simão de Myron Cardoso

**Avaliação da perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo usinagem por
fluxo abrasivo de matrizes e punções**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.
Orientador: Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr.
Coorientadora: Prof^a. Luciana Rohde, Dra.
Coorientador: Fernando Moreira Bordin, Dr.

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Cardoso, Gabriela Simão de Myron

Avaliação da perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo usinagem por fluxo abrasivo de matrizes e punções / Gabriela Simão de Myron Cardoso ; orientador, Fabio Antonio Xavier, coorientadora, Luciana Rohde, coorientador, Fernando Moreira Bordin, 2024.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. usinagem por fluxo abrasivo. 3. UFA. 4. desgaste. I. Xavier, Fabio Antonio. II. Rohde, Luciana. III. Bordin, Fernando Moreira IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. V. Título.

Gabriela Simão de Myron Cardoso

**Avaliação da perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo usinagem por
fluxo abrasivo de matrizes e punções**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira de Materiais” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 15 de agosto de 2024.

Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Guilherme Mariz de Oliveira Barra, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Erick Cardoso Costa, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Simone Negromonte Simão de Myron Cardoso e Marino de Myron Cardoso Filho, por me incentivarem e me apoiarem durante toda minha vida.

Aos meus amigos Letícia Quevedo, Eng. Thabata Closs, Me. Eng. Maria Eduarda Xavier, Mariah Fernanda Sousa, Vitória Salazar, Eng. Marina Dias, Eng. Victor Hugo Faria, Eng. Maria Mária Holleweger, Raulino Junior, Eng. Diego Amorim, Eng. Mayra Silvyane Lopes e demais colegas que me fizeram companhia nos momentos de tranquilidade e de dificuldade passados durante a graduação e antes dela. Por me darem suporte sempre que preciso e pelas risadas e problemas compartilhados.

Ao meu coorientador Dr. Eng. Fernando Moreira Bordin, pela dedicação diária ao meu desenvolvimento profissional e pessoal, ensinamentos, tempo dedicado e auxílio para desenvolvimento deste trabalho. À minha coorientadora Prof. Dr^a Luciana Rohde, pelo suporte e auxílio e ao meu orientador Prof. Dr. Fabio Antonio Xavier.

Aos meus colegas de laboratório, em especial Eng. Natalie Heinz, Eng. Beatriz Cardoso, Me. Eng. Sara Dias, pelo apoio e suporte nessa jornada.

Aos meus chefes em atividades desenvolvidas anteriormente, Dr^a. Rayane Kunert Langbehn e Me. Letícia Espíndola Machado, pois a minha busca por formação é resultado da dedicação de vocês.

À empresa parceira, pela oportunidade de aprendizado e de desenvolvimento e a todos os colegas que nela atuam, os quais auxiliaram para que este trabalho possível, sempre dispostos a ajudar.

Aos laboratórios que realizaram os ensaios deste projeto: Laboratório de Pavimentação, Grupo de Pesquisa em Polímeros e Manufatura Aditiva e Laboratório de Controle de Processos de Polimerização. E à seus membros, que foram sempre abertos e solícitos à ajudar.

Por fim, à todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da minha graduação e dessa pesquisa.

RESUMO

A Usinagem por Fluxo Abrasivo (UFA) é uma técnica avançada de usinagem não convencional utilizada para rebarbar, polir e arredondar superfícies e arestas internas e externas de peças complexas. Esta encontra aplicação em diversos materiais, como metais, cerâmicas e compósitos, sendo amplamente utilizada em indústrias automotivas, biomédicas e aeroespaciais. O presente estudo visa descrever a perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo de UFA de matrizes e punções, com foco em analisar o meio abrasivo, o processo de usinagem em questão e a superfície usinada. Desta forma, através da realização de ensaios em campo, uma máquina-ferramenta para UFA é empregada na usinagem de matrizes e punções. Os dados gerados são registrados de maneira contínua e a cada intervalo aproximado de 1300 ciclos, também é conduzida a usinagem de um corpo de prova padronizado, seguida da coleta de 250g de meio abrasivo. Os resultados experimentais demonstram um processo com rápida perda de propriedades, o qual apresenta um aumento do tempo por ciclo próximo ao final do experimento e uma piora da qualidade da superfície usinada. Também é possível observar através dos experimentos, um compósito com uma combinação única de propriedades reológicas, as quais apresentam drástica variação com o desgaste do meio abrasivo. Nas análises químicas não observa-se alterações, enquanto nas análises térmicas percebe-se um polímero estável, o qual perde sua estabilidade térmica com o uso prolongado. Logo, conclui-se que ambas, a perda parcial da estabilidade do polímero e as alterações reológicas, ocorrem devido a fatores físicos, como relaxação de tensões internas e perda de plastificante seguido de aumento da cristalinidade, formação de redes de reticulação e fadiga mecânica.

Palavras-chave: usinagem por fluxo abrasivo, UFA, desgaste.

ABSTRACT

The Abrasive Flow Machining (AFM) is an advanced unconventional machining technique used for deburring, polishing, and rounding internal and external surfaces and edges of complex parts. It finds application in various materials, such as metals, ceramics, and composites, and is widely used in automotive, biomedical, and aerospace industries. This study aims to describe the efficiency loss of the abrasive medium used in the AFM process for dies and punches, focusing on analyzing the abrasive medium, the machining process in question, and the machined surface. Thus, through field tests, a machine tool for AFM is employed in the machining of dies and punches. The generated data are continuously recorded, and at approximately every 1300 cycles, the machining of a standardized test piece is also conducted, followed by the collection of 250g of abrasive medium. Experimental results demonstrate a process with a rapid loss of properties, showing an increase in cycle time near the end of the experiment and a deterioration in the quality of the machined surface. It is also possible to observe through the experiments a composite with a unique combination of rheological properties, which exhibit drastic variation with the wear of the abrasive medium. Chemical analyses show no changes, while thermal analyses indicate a stable polymer, which loses its thermal stability with prolonged use. Therefore, it is concluded that both the partial loss of polymer stability and the rheological changes occur due to physical factors, such as internal stress relaxation and loss of plasticizer followed by increased crystallinity, formation of cross-linking networks, and mechanical fatigue.

Keywords: abrasive flow machining, AFM, wear.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Parâmetros de processo da UFA | 12 |
| Figura 2 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo unidirecional | 16 |
| Figura 3 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo bidirecional | 17 |
| Figura 4 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo multidirecional | 17 |
| Figura 5 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo orbital . . . | 18 |
| Figura 6 – Etapas de UFA da rugosidade inicial até a rugosidade crítica | 19 |
| Figura 7 – Modelo esquemático das forças de corte | 20 |
| Figura 8 – Moléculas do plastificante no polímero base | 23 |
| Figura 9 – Impacto do aumento do conteúdo de plastificante nas forças secundárias . . | 23 |
| Figura 10 – Componentes do meio abrasivo | 23 |
| Figura 11 – Atuação das componentes elástica e viscosa na partícula abrasiva | 24 |
| Figura 12 – Comportamento de de tensão ou deformação γ nos ensaios de Varredura de (a) Amplitude e (b) Frequência | 25 |
| Figura 13 – Desenho esquemático da geometria prato/prato utilizada nas análises | 25 |
| Figura 14 – Comportamentos dos fluidos comparados ao Fluido Newtoniano | 27 |
| Figura 15 – Diagrama do fluxo dos ensaios realizados | 29 |
| Figura 16 – Tempo por ciclo de usinagem de amostra | 37 |
| Figura 17 – Número de ciclos de usinagem por amostra | 38 |
| Figura 18 – Rugosidades dos corpos de prova em função da posição de medição: (a) altura igual a zero, (b) altura igual a 13,3 mm | 39 |
| Figura 19 – Varredura de Amplitude das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04 | 40 |
| Figura 20 – Varredura de Frequência das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04 | 41 |
| Figura 21 – Viscosidade Complexa | 42 |
| Figura 22 – Fluência e Recuperação | 43 |
| Figura 23 – Percentuais elásticos e viscosos | 43 |
| Figura 24 – Rampa de Fluxo <i>up & down</i> das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04 | 44 |
| Figura 25 – Varredura de Fluxo das Amostras 00 e 05 | 45 |
| Figura 26 – Rampa de Temperatura de Fluxo das Amostras 00 e 05 | 46 |
| Figura 27 – FTIR | 47 |
| Figura 28 – Termogravimetria | 48 |
| Figura 29 – Termogravimetria Derivada | 48 |
| Figura 30 – Porcentagem de sólidos | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Composição do meio abrasivo | 29 |
| Tabela 2 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Amplitude | 33 |
| Tabela 3 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Frequência | 33 |
| Tabela 4 – Parâmetros utilizados no ensaio de Fluência e Recuperação | 34 |
| Tabela 5 – Parâmetros utilizados no ensaio de Rampa de Fluxo <i>up & down</i> | 34 |
| Tabela 6 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Fluxo | 35 |
| Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ensaio de Rampa de Temperatura de Fluxo | 35 |
| Tabela 8 – Parâmetros utilizados no Ensaio de FTIR | 35 |
| Tabela 9 – Parâmetros utilizados no Ensaio de Termogravimetria | 36 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| AFM | Abrasive Flow Machining |
| DTG | Termogravimetria Derivada |
| FTIR | Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier |
| LVER | Região de Viscoelasticidade Linear |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| TG | Termogravimetria |
| UFA | Usinagem por Fluxo Abrasivo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|---|
| G'' | Módulo de Perda ou Módulo Viscoso |
| G' | Módulo de Armazenamento ou Módulo Elástico |
| η^* | Viscosidade Complexa |
| t_e | Tempo total de ensaio |
| Σ | Somatório |
| H_t | Hora de término |
| H_i | Hora de início |
| t_c | Tempo de usinagem por ciclo |
| N_c | Número de ciclos |
| R_a | Rugosidade média |
| R_q | Desvio médio quadrático |
| R_{vk} | Altura reduzida do vale |
| R_{pk} | Altura reduzida do pico |
| R_z | Rugosidade total |
| R_{media} | Rugosidade média entre medições equidistantes |
| R_0 | Rugosidade medida a 0° |
| R_{180} | Rugosidade medida a 180° |
| R_{VPR} | Variação Percentual das Rugosidades |
| R_f | Rugosidade Final |
| R_i | Rugosidade Inicial |
| $Perctual_e$ | Percentual Elástico |
| ε_e | Deformação Elástica |
| ε_t | Deformação Total |
| $Perctual_v$ | Percentual Viscoso |

SUMÁRIO

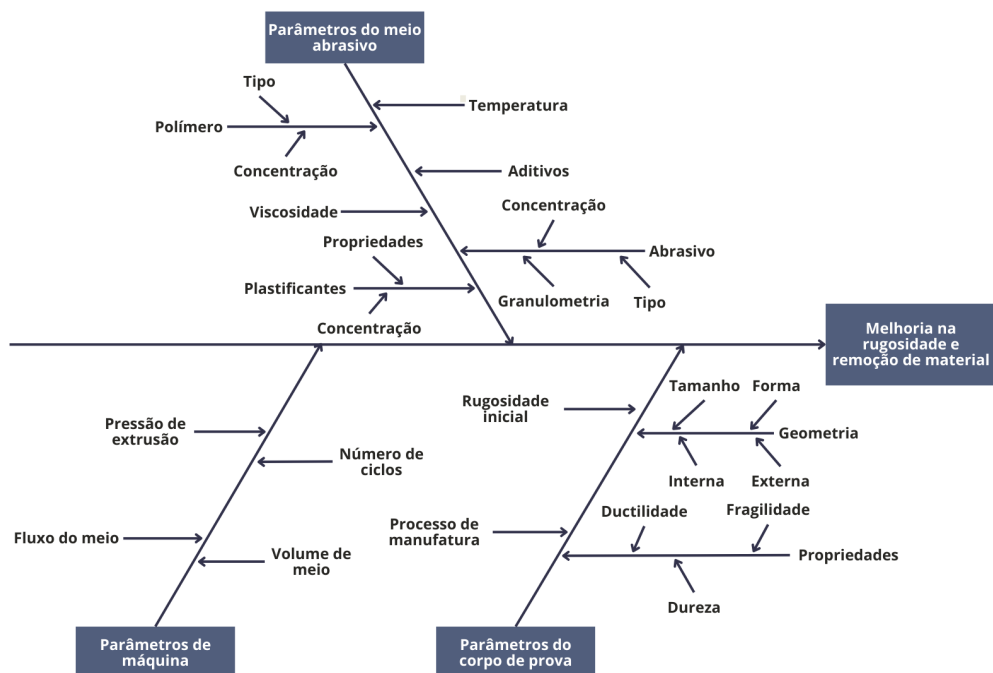
| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO | 15 |
| 2.1.1 | Variantes do processo de UFA | 16 |
| 2.1.2 | Parâmetros de entrada do processo de UFA | 18 |
| 2.1.3 | Mecanismos de remoção de material do processo de UFA | 19 |
| 2.2 | MEIO ABRASIVO | 21 |
| 2.2.1 | Composição do meio abrasivo | 22 |
| 2.3 | MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MEIO ABRASIVO | 24 |
| 2.3.1 | Reologia | 24 |
| 2.3.2 | Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier | 27 |
| 2.3.3 | Termogravimetria | 27 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 | ENSAIO DE USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO | 29 |
| 3.2 | RECOLHIMENTO DOS DADOS E AMOSTRAS | 30 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS | 30 |
| 3.3.1 | Caracterização da duração e quantidade total de ciclos do ensaio | 30 |
| 3.3.2 | Caracterização da variação do fluxo do meio abrasivo | 31 |
| 3.3.3 | Caracterização da qualidade da superfície das peças usinadas | 31 |
| 3.3.4 | Caracterização reológica do meio abrasivo | 32 |
| 3.3.5 | Caracterização da composição química do meio abrasivo | 35 |
| 3.3.6 | Caracterização térmica do meio abrasivo | 35 |
| 4 | RESULTADOS | 37 |
| 4.1 | VARIAÇÃO DO FLUXO DO MEIO MEIO ABRASIVO | 37 |
| 4.2 | QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA | 38 |
| 4.3 | PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO MEIO ABRASIVO | 39 |
| 4.4 | GRUPOS FUNCIONAIS QUE COMPÕEM O MEIO ABRASIVO | 47 |
| 4.5 | TEMPERATURA DE DEGRADAÇÃO DOS GRUPOS FUNCIONAIS | 47 |
| 5 | CONCLUSÕES | 51 |
| | REFERÊNCIAS | 53 |
| | APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA | 55 |
| | APÊNDICE B – VARREDURA DE AMPLITUDE | 56 |
| | APÊNDICE C – VARREDURA DE FREQUÊNCIA | 57 |
| | APÊNDICE D – RAMPA DE FLUXO UP & DOWN | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Conforme indicado por Singh *et al.* (2022), cerca de 40% do custo total de um produto é destinado ao acabamento desejado, sendo a Usinagem por Fluxo Abrasivo (UFA) um dos métodos de acabamento não convencional mais utilizados. O processo de UFA foi desenvolvido e patenteado pela Extrude Hone Corporation na década de 1960 (Ansari *et al.*, 2022). Neste processo de usinagem, a superfície de trabalho é sujeita à remoção através da extrusão de um meio abrasivo que passa por uma abertura restrita entre o componente e a ferramenta. Como resultado, novas superfícies são formadas pela ação dos grãos abrasivos sobre as irregularidades presentes na superfície dos componentes (Dixit; Sharma; Kumar, 2021).

Os principais parâmetros de controle deste processo e aos quais deve-se atentar para uma melhoria da rugosidade e eficiência de remoção de material, incluem os parâmetros relacionados à máquina, ao corpo de prova e ao meio abrasivo, conforme ilustrado na Figura 1. Os parâmetros de máquina são parâmetros de usinagem configurados na máquina-ferramenta e podem ser adequados a depender dos parâmetros do corpo de prova e do meio abrasivo, entretanto, uma vez atingida a eficiência do processo, devem permanecer fixos. Os parâmetros relacionados ao corpo de prova são característicos dos processos de produção anteriores a usinagem de acabamento e podem apresentar certa variação entre um corpo de prova e outro. E, por fim, os parâmetros relativos ao meio abrasivo são de mais difícil controle e podem apresentar variação no decorrer do processo de usinagem (Singh *et al.*, 2022).

Figura 1 – Parâmetros de processo da UFA



Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

O meio abrasivo do processo de UFA é um material compósito viscoelástico complexo,

normalmente composto por um polímero base, plastificante e aditivos. Nesse compósito, os diferentes grupos funcionais exibem propriedades distintas, viscosas e elásticas, as quais variam conforme diversas condições, tais como tempo, temperatura, taxa de cisalhamento, tensão, deformação e outros (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

Segundo Dixit, Sharma e Kumar (2021), as análises reológica e térmica do meio abrasivo são imprescindíveis para compreender seu comportamento sob ação de diferentes esforços mecânicos e térmicos. O mesmo autor, em sua revisão, também conclui que investigações da degradação do meio abrasivo e desgaste das partículas abrasivas e superfícies de trabalho constituem alguns dos principais temas de pesquisas futuras a respeito da UFA.

Logo, é relevante destacar que, até o presente momento, apenas dois estudos investigando as propriedades reológicas do meio abrasivo sob desgaste foram encontrados (Bremerstein; Höhn *et al.*, 2014; Bremerstein; Potthoff *et al.*, 2015), fato que, aliado às conclusões de Dixit, Sharma e Kumar (2021), evidencia a significância científica de pesquisas nessa área.

Na presente monografia, destaca-se a problemática relacionada à escassez de compreensão acerca das propriedades reológicas, químicas e térmicas, bem como das variáveis determinantes no processo de perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo de UFA em empresa do setor automotivo catarinense.

Assim, o objetivo desta monografia é avaliar o comportamento reológico, estático e dinâmico, além de aspectos térmicos e químicos do meio abrasivo. Pretende-se também, avaliar a perda de eficiência do meio abrasivo através da análise dos dados fornecidos pela máquina ferramenta, assim como da análise da superfície obtida nas peças produzidas sem aumento da quantidade de ciclos programados.

A metodologia empregada envolveu a realização de ensaios em campo utilizando uma máquina-ferramenta para usinagem por fluxo abrasivo de duas vias. Esta máquina-ferramenta é empregada na usinagem de matrizes e punções e os dados gerados são registrados de maneira contínua. A cada intervalo aproximado de 1300 ciclos é conduzida a usinagem de um corpo de prova padronizado, seguida da coleta de 250g de meio abrasivo para a posterior caracterização dos mesmos.

Outrossim, as análises realizadas no meio abrasivo incluem, a análise térmica, a qual é conduzida por meio da técnica de Termogravimetria. A análise química, realizada utilizando Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier, visa identificar, de maneira comparativa, eventuais alterações químicas no meio abrasivo. As análises reológicas abrangem os seguintes procedimentos: Varredura de Frequência, Varredura de Tensão, Fluência e Recuperação, Rampa de fluxo *up & down*, Varredura de fluxo e Rampa de temperatura de fluxo; as quais têm como objetivo elucidar as alterações, especialmente aquelas relacionadas à variação na viscoelasticidade e nas propriedades viscosas do material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Descrever a perda de eficiência do meio abrasivo utilizado no processo de UFA de matrizes e punções, com foco em analisar o meio abrasivo, o processo de usinagem em questão e a superfície usinada.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever o ensaio de usinagem por fluxo abrasivo através de sua duração e quantidade total de ciclos;
- Determinar a perda de eficiência do meio abrasivo através da análise da variação do fluxo do meio de usinagem por ciclo;
- Correlacionar a perda de eficiência do meio abrasivo com a qualidade da superfície obtida nos corpos de prova sem aumento da quantidade de ciclos programados e nas peças usinadas;
- Determinar as propriedades reológicas (estáticas e dinâmicas) e suas alterações na perda de eficiência do meio abrasivo;
- Identificar os grupos funcionais que compõem o meio polimérico e seu comportamento através da perda de eficiência do meio abrasivo;
- Determinar a temperatura de degradação dos grupos funcionais que compõem o polímero;
- Relacionar condições de processamento com os resultados das análises reológicas e químicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO

Processos de usinagem como a lapidação, retificação e brunimento são excelentes para peças planas ou cilíndricas, entretanto, tais processos de usinagem possuem inúmeras desvantagens em peças com geometrias mais complexas, como peças com superfícies livres. Assim, diversas técnicas para promover o acabamento de tais componentes vêm sendo estudadas, entre elas, a usinagem por fluxo abrasivo ou UFA (Goyal *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2023).

UFA é um processo avançado de usinagem não tradicional que tem por objetivo rebarbar, refinar, polir ou arredondar superfícies e arestas internas ou externas de peças com geometrias complexas ou de difícil acesso. Este é um processo eficiente de acabamento com precisão, que, além do supracitado, também encontra grande área de aplicação na remoção de camadas recristalizadas geradas em processos anteriores de usinagem (Bremerstein; Potthoff *et al.*, 2015; Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Goyal *et al.*, 2022).

Este processo de usinagem é utilizado em uma ampla variedade de materiais, dentre eles: metais, cerâmicas, compósitos, superligas e outros; tornando suas aplicações industriais variadas. Estas incluem acabamento de peças para implantes biomédicos, microcomponentes, componentes aeroespaciais e automotivos, indústrias de moldes e matrizes, fabricação de peças em larga escala e muitos outros (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Kumar *et al.*, 2023). Assim, como destacado por Kumar *et al.* (2023), este é um método confiável, econômico e eficaz para aplicações em peças com geometrias complexas.

Por fim, apesar de ser destacado que este é um processo econômico comparado a outros processos de acabamento, não poderia ser minimizado o aumento abrupto do valor de produção de uma peça quando sua rugosidade se encontra na casa de precisão dos micrometros, como o resultado obtido pela UFA. O processo de UFA permite uma remoção de material da ordem de 10^{-3} gramas, admitindo uma rugosidade da ordem de 10^{-9} metros, acabamento esse que apresenta custo, porém também acarreta em valor agregado à peça. Esta, com melhora das características da superfície, tem seu desempenho e vida útil elevados (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Goyal *et al.*, 2022; Souza Gonçalves *et al.*, 2023).

Assim, este método de usinagem, em sua essência, utiliza um polímero viscoelástico com adição de grãos abrasivos, os quais podem ser cerâmicos ou metálicos. O compósito viscoelástico é extrudado através das superfícies, bordas e cavidades dos componentes, utilizando de um grande número de gumes para remoção bem-sucedida do cavaco. O meio abrasivo se auto-deforma e a remoção de material ocorre justamente quando o mesmo passa pelos caminhos restritos impostos pelos componentes. Assim, o meio abrasivo deve apresentar boa viscosidade, sendo uma ferramenta de corte flexível, como requerido para as aplicações supracitadas (Goyal *et al.*, 2022).

Os grãos micrométricos possuem orientação e geometria variadas e produzem cavacos pequenos quando comparados com ferramentas de corte definidas. Assim, os cavacos de menores

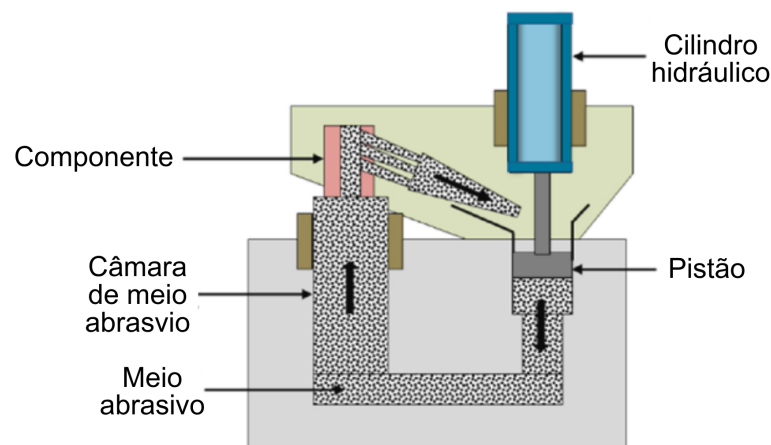
dimensões permitem “um bom acabamento, tolerâncias mais próximas e a criação de boas características de superfície” (Goyal *et al.*, 2022, pg. 3065).

Dixit, Sharma e Kumar (2021) apontam cinco campos principais de desenvolvimento recente na área “desenvolvimento do processo UFA e suas variantes, análise paramétrica da UFA, desenvolvimento de meio abrasivo, modelagem do processo UFA e alguns estudos baseados em aplicações” (Dixit; Sharma; Kumar, 2021, pg. 1438)

2.1.1 Variantes do processo de UFA

A UFA foi desenvolvida com movimentação unidirecional do meio abrasivo. Nesse método, mostrado na Figura 2, o meio abrasivo é extrudado através do componente em uma única direção, o mesmo é coletado e reabastecido, reiniciando o processo. O processo possui uma configuração simples e é capaz de usinar peças de larga escala, porém é demorado, devido a necessidade constante de reabastecimento (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Goyal *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2023).

Figura 2 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo unidirecional

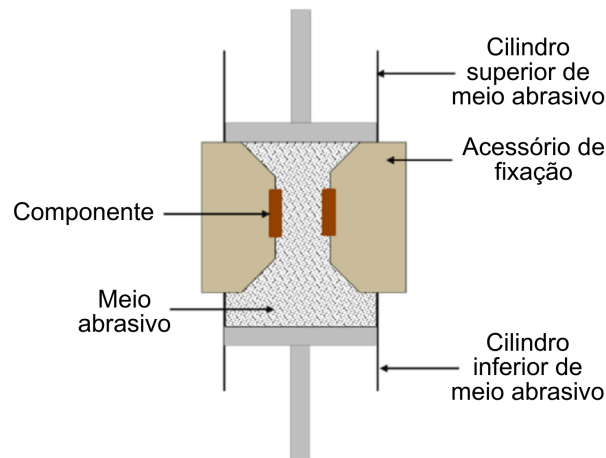


Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

Com o intuito de aprimorar o desempenho do processo de UFA, três diferentes configurações de cilindros e movimentação de meio abrasivo foram desenvolvidos partindo da configuração inicial.

Uma das três configurações derivadas do processo unidirecional foi UFA por movimentação bidirecional. Nesse método a máquina ferramenta, apresentada na Figura 3, possui dois cilindros opostos, com a função de fixar o componente e selar o equipamento durante a extrusão do meio abrasivo em ambos os sentidos. Em comparação com UFA unidirecional, o UFA bidirecional permite um melhor controle e agilidade do processo, evitando a necessidade de reabastecimento e proporcionando a possibilidade de automatização do sistema (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Goyal *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2023).

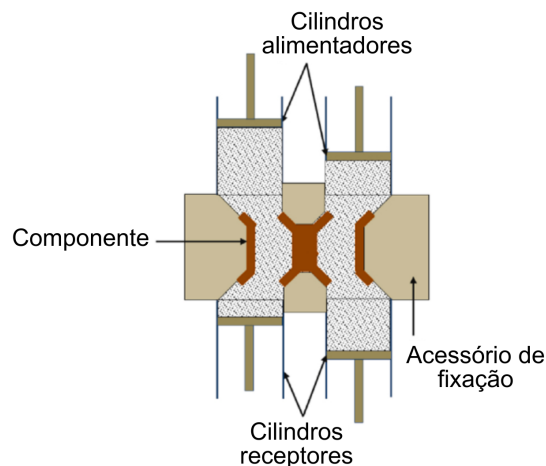
Figura 3 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo bidirecional



Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

Outra configuração das máquinas de UFA é a multidirecional, mostrada na Figura 4, em que múltiplos cilindros podem ser operados separadamente em composição semelhante à configuração bidirecional, ou seja, há múltiplos cilindros opostos entre si, os quais permitem parametrizações individuais das máquinas (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Kumar *et al.*, 2023).

Figura 4 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo multidirecional



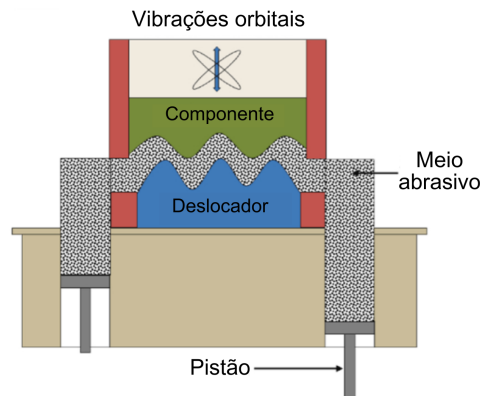
Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

Em comparação com os demais processos, UFA multidirecional permite a usinagem simultânea e independente de diferentes componentes, reduzindo o tempo de usinagem e aumentando a possibilidade de automação do sistema (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Kumar *et al.*, 2023).

Outrossim, uma outra configuração de máquina-ferramenta é a UFA orbital, a qual é

mostrada na Figura 5, diferentemente das máquinas mostradas anteriormente, nesta configuração o meio abrasivo não é extrudado através da peça, mas sim, ocorrem pequenas oscilações. Assim, o meio abrasivo, que é colocado sobre a superfície de interesse, promove o acabamento da peça (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Goyal *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2022).

Figura 5 – Representação de uma máquina de usinagem por fluxo abrasivo orbital



Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

Com o intuito de aumentar ainda mais a taxa de remoção de material e diminuir o tempo de usinagem, foram desenvolvidos processos híbridos, os quais combinam outras técnicas de usinagem com o processo de UFA. Alguns exemplos são a utilização de campo magnético, campo magnetoreológico, ultrassom e outros, porém estes não serão abordados no presente trabalho (Kumar *et al.*, 2023; Souza Gonçalves *et al.*, 2023).

2.1.2 Parâmetros de entrada do processo de UFA

Conforme exposto por Bremerstein, Potthoff *et al.* (2015) e ilustrado por Dixit, Sharma e Kumar (2021), há três grupos de parâmetros de entrada de processo que devem ser observados para um melhor acabamento da superfície nos processos de UFA. São eles: os parâmetros de máquina; parâmetros do corpo de prova e parâmetros do meio abrasivo.

Os parâmetros de máquina ou controlados pela máquina devem permanecer fixos uma vez atingida a eficiência do processo, garantindo assim resultados consistentes. Os parâmetros de corpo de prova, em especial a rugosidade inicial, são variáveis entre os corpos de prova, podendo apresentar maior ou menor variação dependendo da operação de usinagem anterior e do rigor da empresa ou laboratório. Por fim, os parâmetros do meio abrasivo, em especial as propriedades reológicas, são alterados de acordo com o desgaste do mesmo durante o processo de usinagem, sendo seu controle mais complexo (Bremerstein; Potthoff *et al.*, 2015).

No equilíbrio entre a taxa de remoção de material e a qualidade de superfície “número de ciclos de acabamento, concentração e tamanho dos abrasivos, pressão de extrusão e viscosidade do meio abrasivo são os parâmetros de entrada mais importantes” (Goyal *et al.*, 2022, p.

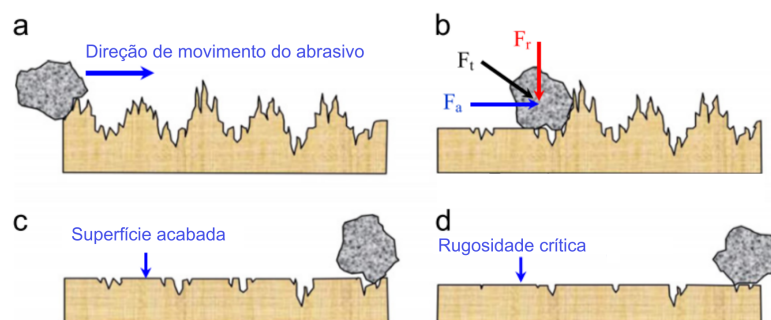
3070). Entretanto, é consenso entre ambos Goyal *et al.* (2022) e Rajesha *et al.* (2010), que o comportamento reológico do meio abrasivo é o principal parâmetro que determina a qualidade da superfície usinada. Em comparação, Gorana, Jain e Lal (2006) destacam a viscosidade do meio abrasivo e o desgaste dos grãos como principais parâmetros de processo que afetam a qualidade do acabamento da superfície. Por fim, é importante ressaltar que a operação de usinagem anterior à UFA também afeta significativamente o acabamento da superfície e a remoção de material (Gorana; Jain; Lal, 2006).

Por ser um processo de usinagem complexo, o qual ocorre em equipamento fechado, inviabilizando a observação, além de apresentar aleatoriedade da distribuição dos grãos abrasivos no meio abrasivo, há diversos modelos matemáticos e simulações que se propõem a descrever o processo de UFA. Entretanto, até o momento, a maioria apresentam dificuldade de ajuste dos parâmetros e baseiam-se em muitas suposições, as quais experimentalmente demonstraram contradizer a realidade (Goyal *et al.*, 2022), apesar da importância dos modelos para os estudos do UFA, estes não serão abordados no presente estudo.

2.1.3 Mecanismos de remoção de material do processo de UFA

No processo de usinagem por fluxo abrasivo, os grãos abrasivos atingem profundidades pequenas de indentação, gerando uma deformação em escala microscópica, como mostrado na Figura 6. Estes grãos são mantidos em ligação semissólida com o meio e geram abrasão aleatória sobre irregularidades presentes na superfície da peça, assim novas superfícies são formadas. Essa remoção de material, como em outras formas de usinagem abrasiva, pode ocorrer por três diferentes mecanismos presentes na remoção de cavaco, são eles deslizamento livre, micro-sulcamento e micro-cisalhamento (Dixit; Sharma; Kumar, 2021; Gorana; Jain; Lal, 2006).

Figura 6 – Etapas de UFA da rugosidade inicial até a rugosidade crítica



Fonte: Adaptado de Ravi Sankar et al. (2011)

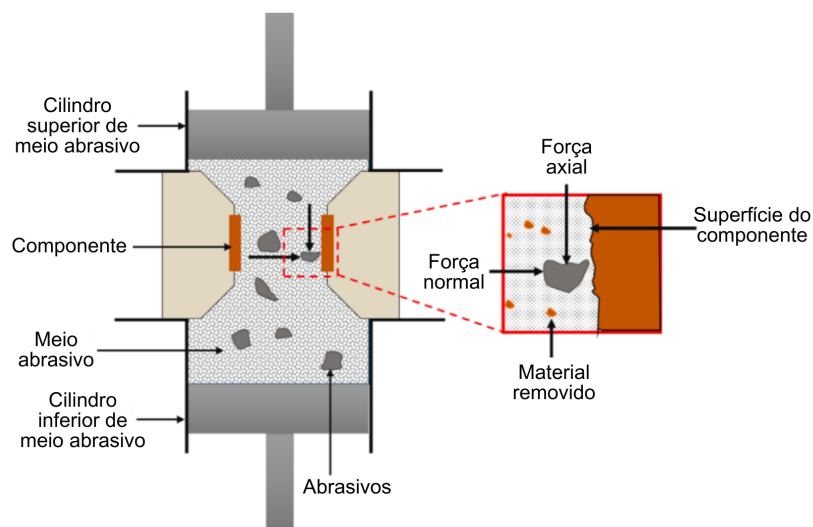
O deslizamento livre pode ser atribuído à deformação elástica associada ao arrasto entre grãos abrasivos e a superfície do componente; já no mecanismo de remoção por micro-sulcamento pode-se observar uma deformação plástica, na qual o material é deslocado e remo-

vido da peça; por fim, no mecanismo de micro-cisalhamento, o material da peça é removido na forma de micro lascamentos (Gorana; Jain; Lal, 2006).

No entendimento dos mecanismos de corte, de acordo com os mesmos autores, tamanho e afiação do grão abrasivo, dureza relativa peça-grão, pressão de extrusão e pressão relativa gerada pelas aberturas do componente são as variáveis principais que determinam a profundidade de corte, e, assim, o mecanismo atuante. Dixit, Sharma e Kumar (2021) também afirmam que as propriedades mecânicas do componente, além da dureza relativa, influenciam no mecanismo de corte, sendo micro-sulcamento e micro-cisalhamento comuns e simultâneos em materiais dúcteis, enquanto materiais frágeis são usinados predominantemente por micro-cisalhamento.

Para o entendimento das forças de corte, a pressão de extrusão, aplicada pelo pistão, gera uma força normal (radial) e uma força axial, como esquematizado nas Figura 6 e Figura 7. A indentação na peça é gerada pela força normal, enquanto o deslocamento do material é gerado pela força axial, a qual possui dois componentes, a força de sulcamento e a força de deslizamento (Gorana; Jain; Lal, 2006).

Figura 7 – Modelo esquemático das forças de corte



Fonte: Adaptado de Dixit, Sharma e Kumar (2021)

Assim, Gorana, Jain e Lal (2006) afirmam que seus resultados permitiram a observação que a força axial, a força normal, a densidade de grãos ativos e a profundidade de indentação do grão apresentaram uma influência significativa na escala da deformação do material. Desta forma, com uma elevada velocidade do meio abrasivo ocorre uma remoção elevada, enquanto o aumento na viscosidade do meio abrasivo e na pressão, eleva a taxa de remoção de material, ao mesmo tempo que diminui a qualidade do acabamento da superfície (Gorana; Jain; Lal, 2006).

2.2 MEIO ABRASIVO

O meio abrasivo é um meio transportador semissólido polimérico com partículas abrasivas em teores sólidos que variam entre 15 e 50% em volume. Este meio é um fluido não newtoniano deformável e viscoelástico, o qual não deve ser reativo ou corrosivo e deve, ao mesmo tempo, proporcionar uma baixa rugosidade e uma elevada taxa de remoção de material (Bremerstein; Höhn *et al.*, 2014; Bremerstein; Potthoff *et al.*, 2015; Goyal *et al.*, 2022).

Um material viscoelástico é caracterizado como um material que apresenta simultaneamente propriedades ou porções elástica e viscosa durante seu fluxo e deformação. Desta forma, o “componente elástico do meio resulta do estiramento das ligações, mas o componente viscoso, é devido à difusão das moléculas” (Ravi Sankar *et al.*, 2011, p. 950), sendo também o comportamento viscoso dependente do tempo, uma vez que o polímero é amorfo por natureza e suas cadeias poliméricas se reorganizam para resistir à tensão aplicada (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

Bremerstein, Höhn *et al.* (2014) explicam a relação entre a proporção elástica e viscosa, as forças de corte e o acabamento da superfície. A proporção elástica do meio abrasivo, quanto mais presente, maior a dificuldade do meio abrasivo em se deformar e, por consequência, se adaptar aos contornos da peça. A elevada proporção elástica, também resulta em forças normais mais atuantes e, desta forma, há uma maior presença de sulcos profundos na peça e a taxa de remoção de material é maior. A proporção viscosa, quanto mais atuante, maior a facilidade do meio abrasivo em se deformar e fluir. Assim, as forças normais de indentação são menores, uma vez que as cadeias poliméricas têm maior facilidade em deslizar umas sobre as outras, assim os sulcos na superfície são mais superficiais e a remoção de material é menor.

Desta forma, conforme o tempo de usinagem do meio abrasivo aumenta, a proporção elástica e a viscosidade do mesmo também aumentam, uma vez que, devido ao aumento de temperatura e ao esforço mecânico, as longas cadeias se desintegram em pequenos segmentos e a proporção de partículas finas aumentam. As partículas finas, geradas devido à fragmentação de partículas maiores e, também, devido à absorção do cavaco pelo meio abrasivo, possuem uma maior influência na viscosidade do material comparado às partículas grossas (Bremerstein; Höhn *et al.*, 2014; Bremerstein; Potthoff *et al.*, 2015; Ravi Sankar *et al.*, 2011).

As propriedades reológicas do meio abrasivo, em especial a viscoelasticidade, são de extrema importância para compreender tal processo de usinagem, como já citado na Seção 2.1.2, uma vez que o meio é o responsável por ancorar as partículas abrasivas sob o estresse mecânico gerado pelo processo de usinagem. Estas propriedades são, em grande parte, influenciadas pelas propriedades dos componentes individuais do meio abrasivo, sendo estes, o polímero base e plastificante, as partículas abrasivas e seu desgaste. Assim, destaca-se que tais propriedades são altamente afetadas pelo processo de usinagem, até o ponto que meio abrasivo não é mais utilizável e necessita substituição, entretanto, poucos estudos sistemáticos sobre tal desgaste foram registrados (Bremerstein; Höhn *et al.*, 2014).

Até o momento, também não há critério de desgaste objetivo para o meio abrasivo, uma vez que o sistema e suas interações são extremamente complexas e sua vida útil depende de uma

série de fatores, como os parâmetros de máquina e do corpo de prova, além da composição do polímero, plastificante e abrasivos. Entretanto, podem ser citadas algumas possíveis alterações nas propriedades da suspensão que contribuem para o desgaste da mesma: o meio transportador pode sofrer alterações em sua viscosidade e composição química, além de outras alterações no comportamento reológico e estabilidade da suspensão e as partículas abrasivas podem sofrer desgaste, alteração de tamanho e forma e alterações químicas na superfície através de processos de adsorção e oxidação (Bremerstein; Höhn *et al.*, 2014).

2.2.1 Composição do meio abrasivo

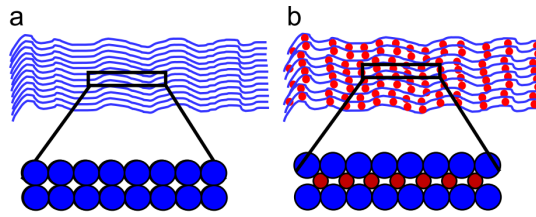
Os polímeros apresentam propriedades reológicas únicas que dependem das interações entre as cadeias e do formato das moléculas, o formato das moléculas também determina as estruturas formadas e essas também influenciam nas propriedades reológicas. Essa unicidade é um dos maiores motivos que determinam a necessidade de medir tais propriedades reológicas para a compreensão do comportamento destes polímeros no processo de usinagem (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

O meio abrasivo do processo de UFA é um material viscoelástico complexo, composto por componentes que apresentam propriedades viscosas e/ou elásticas que variam com condições variadas de deformação, taxa de cisalhamento, tensão, tempo e temperatura (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

O polímero base do meio abrasivo, o qual mantém a integridade do mesmo através dos processos de extrusão, além de sustentar as partículas abrasivas, deve ser estável mecanicamente e compatível com o plastificante e os abrasivos. Este, tem a função primordial de conferir ao meio propriedades elásticas e tem suas propriedades físicas, como resistência e flexibilidade, dependentes “do comprimento da cadeia, do número de grupos laterais, da quantidade de ramificações e da reticulação” (Ravi Sankar *et al.*, 2011, p. 948). Desta forma, para um polímero mais resistente, deve-se preferir cadeias mais longas, com a presença de grupos laterais polares, porém sem ramificações, pois estes formam cadeias parcialmente cristalinas ao se agruparem, sendo mais resistentes que polímeros ramificados (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

Os plastificantes são moléculas pequenas, de cadeia curta e de baixo peso molecular, os quais devem ser quimicamente semelhantes aos polímeros base de modo a se difundirem entre as cadeias poliméricas de alto peso molecular do mesmo. As moléculas dos plastificantes, mostradas em vermelho na Figura 8, ao se difundirem aumentam o espaço entre as cadeias do polímero base, em azul. Desta forma, a Figura 8(b) apresenta menores interações entre as cadeias e assim, maior mobilidade, aumentando as propriedades viscosas do meio, quando comparado a Figura 8(a) (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

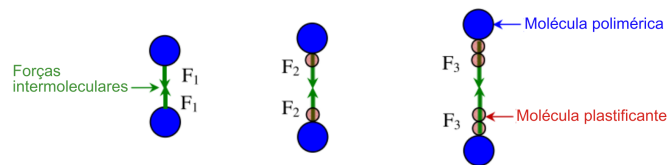
Figura 8 – Moléculas do plastificante no polímero base



Fonte: Adaptado de Ravi Sankar et al. (2011)

Assim, conforme os mesmos autores, devido a seu baixo peso molecular e sua elevada capacidade de difusão entre as cadeias de elevado peso molecular, o plastificante força o afastamento entre as cadeias do polímero de base, diminuindo as interações secundárias. Desta forma, conforme o conteúdo do plastificante aumenta, diminuem as forças intermoleculares, como mostrado na Figura 9, ou seja, $F_1 > F_2 > F_3$. Assim, o polímero base, forçado ao afastamento devido a presença do plastificante, “adquire melhor fluidez, flexibilidade e capacidade de auto deformação” (Ravi Sankar *et al.*, 2011, p. 949).

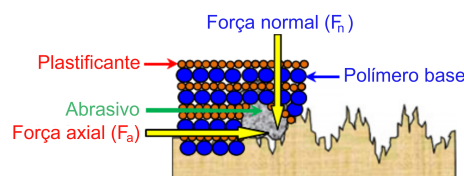
Figura 9 – Impacto do aumento do conteúdo de plastificante nas forças secundárias



Fonte: Adaptado de Ravi Sankar et al. (2011)

A última das componentes do meio abrasivo a ser citada é a partícula abrasiva, a qual deve possuir afinidade com os polímeros e atua como ferramenta de corte, deformando ou removendo material do componente (Ravi Sankar *et al.*, 2011). Assim, de forma resumida, o polímero base, mantém a integridade do meio abrasivo e proporciona principalmente as propriedades elásticas; paralelamente, o plastificante atua principalmente proporcionando propriedades viscosas, sendo a força imposta pelo pistão dividida em componente normal (radial) e axial, como esquematizado na Figura 10.

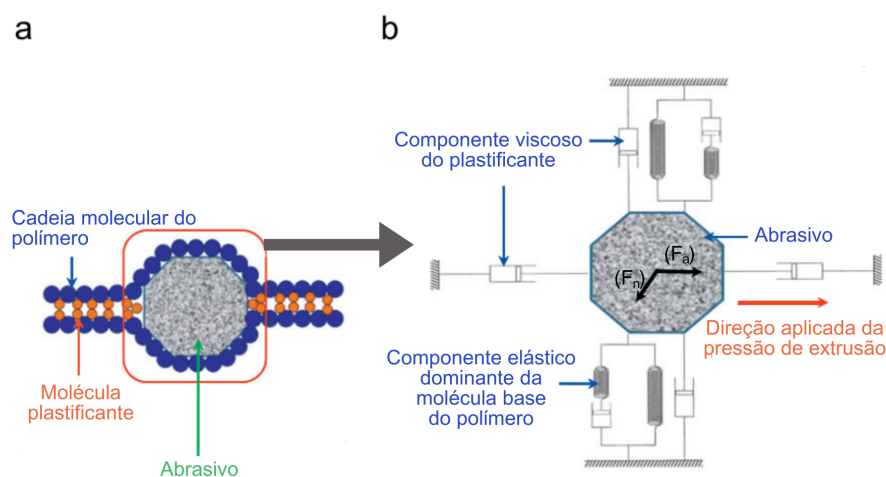
Figura 10 – Componentes do meio abrasivo



Fonte: Adaptado de Ravi Sankar et al. (2011)

Por fim, seguindo o modelo da viscoelasticidade de mola e amortecedor, já é de conhecimento que as cadeias do polímero base e do plastificante sustentam as partículas abrasivas, como pode também ser visto no detalhe a) da Figura 11. Logo, segundo o modelo, o componente elástico, representado pela mola, caracteriza o polímero base, o qual auxilia na força normal e na indentação e o componente viscoso, representado pelo amortecedor, caracteriza o plastificante, o qual auxilia na força axial e na remoção de material. Ambos atuam sobre cada partícula abrasiva, como mostrado no detalhe b) da Figura 11, de forma viscoelástica, gerando o processo de acabamento (Ravi Sankar *et al.*, 2011).

Figura 11 – Atuação das componentes elástica e viscosa na partícula abrasiva



Fonte: Adaptado de Ravi Sankar et al. (2011)

2.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MEIO ABRASIVO

A caracterização reológica, identificação dos grupos funcionais e determinação da temperatura de degradação foram realizados através dos ensaios de reologia, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e termogravimetria respectivamente. Dessa forma, o presente capítulo traz de uma breve descrição de tais ensaios.

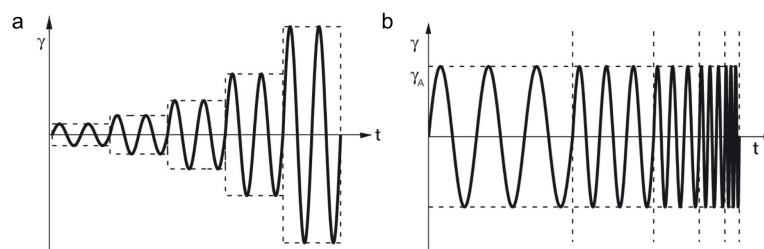
2.3.1 Reologia

A reologia é um ramo da física que estuda a deformação e o fluxo de materiais sólidos e líquidos, tendo suas variáveis principalmente vindas da área de engenharia mecânica. As análises observam velocidades, forças e deflexões, caracterizando materiais viscoelásticos. Os materiais viscoelásticos apresentam comportamentos com ambas características elásticas e viscosas e têm seu comportamento situado entre os comportamentos de líquidos viscosos ideais e sólidos elásticos ideais, podendo tender mais para um dos comportamentos (Mezger, 2006).

A reometria é a análise e mediação de propriedades reológicas, esta possui diversos sistemas de medição, instrumentos e métodos de teste e análise (Mezger, 2006). Algumas das análises relevantes para este estudo serão apresentadas a seguir.

Os ensaios oscilatórios, ou ensaios dinâmicos, são ensaios que se baseiam na aplicação de tensão ou deformações oscilantes, em funções senoidais, como mostrado na Figura 13, para a caracterização de amostras viscoelásticas. Estes ensaios promovem uma abordagem diferente dos ensaios de fluência e recuperação e ambos se complementam, descrevendo diferentes aspectos do comportamento viscoelástico, como detalhado a seguir (Schramm, 1994).

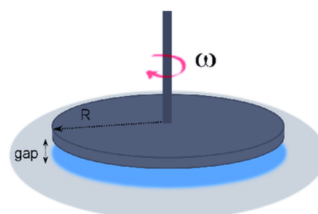
Figura 12 – Comportamento de de tensão ou deformação γ nos ensaios de Varredura de (a) Amplitude e (b) Frequência



Fonte: (a) Anton Paar (2024a) e (b) Anton Paar (2024b)

Os ensaios dinâmicos relacionam uma frequência ou velocidade angular a uma deformação ou tensão no intuito de compreender a viscosidade e elasticidade do material em relação a essa frequência aplicada. Dessa forma, o equipamento, que geralmente possui um prato inferior fixo e um prato ou cone superior que realiza o movimento, gira em uma função temporal senoidal alternante para pequenos ângulos ϕ . Ou seja, a amostra sob tal cisalhamento descrito, se deforma gerando tensão de resistência também senoidais que são medidos pelo equipamento através da amplitude e do ângulo de defasagem δ (Schramm, 1994).

Figura 13 – Desenho esquemático da geometria prato/prato utilizada nas análises



Fonte: Adaptado de Marliere (2013)

Os ensaios oscilatórios mais comuns e também realizados nesse trabalho são os ensaios de Varredura de Amplitude e de Frequência, seus gráficos de γ pelo tempo podem ser vistos

na Figura 13. Ambos, geralmente, avaliam os Módulos de Perda (G'') e de Armazenamento (G'), que representam a parte viscosa do material ou a energia dissipada e a parte elástica do material ou sua rigidez, respectivamente. Sendo comum observar também, no ensaio de Varredura de Frequência, a Viscosidade Complexa (η^*), a qual pode ser calculada através de G'' e G' (Schramm, 1994).

Os ensaios de Fluência e Recuperação, junto aos ensaios oscilatórios, permitem analisar o comportamento viscoso e elástico do material, entretanto, neste ensaio, tem-se uma dependência do tempo de resposta do material, sendo assim, este é considerado um ensaio transiente. Os ensaios de Fluência e Recuperação são realizados em duas partes: o carregamento do material, no qual uma tensão constante é aplicada na amostra e sua deformação é medida; a recuperação, após retirada dessa tensão, na etapa de recuperação, é analisada a porcentagem de recuperação dessa deformação (Schramm, 1994).

Assim, são possíveis alguns comportamentos para os diferentes materiais: para amostras com comportamento sólido elástico ideal, o esforço desaparece completamente e instantaneamente quando a carga é removida, sendo a energia da deformação armazenada elasticamente; para amostras com comportamento líquidos viscoso ideal, a energia não pode ser recuperada, desta forma, no momento em que a tensão é removida, a deformação é mantida; entretanto grande parte dos materiais apresentam um comportamento intermediário, conhecido como comportamento viscoelástico (Schramm, 1994).

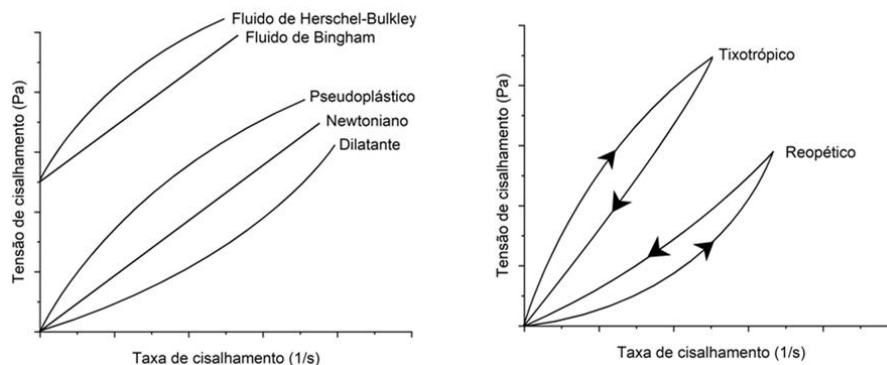
De forma independente da porcentagem elástica, a porcentagem viscosa do material pode apresentar diferentes comportamentos, os quais são estudados pelos Ensaio de Fluxo. De forma simplificada, os fluidos podem apresentar comportamento Newtoniano ou Não Newtoniano. Ao apresentarem comportamento não Newtoniano, estes podem ter um comportamento dependente do tempo ou independente do tempo. Quando apresentam um comportamento dependente do tempo, estes podem ser Reopéticos ou Tixotrópicos, como mostrado na Figura 14. Ao serem independentes do tempo, estes podem apresentar ou não apresentar tensão de cisalhamento inicial. Ao não apresentarem tensão de cisalhamento inicial, estes podem ser Pseudoplásticos ou Dilatantes e ao apresentarem tensão de cisalhamento inicial, estes podem ser Plásticos de Bingham ou Herschel-Bulkley (Machado *et al.*, 2022).

Grande parte dos experimentos para compreender o comportamento viscoso dos fluidos são voltados a fluidos Não Newtonianos, uma vez que, fluidos Newtonianos apresentam viscosidade constante para diferentes taxas de cisalhamento. Assim, para fluidos não Newtonianos, objetiva-se compreender as características como aumento ou diminuição da viscosidade com um aumento da taxa de cisalhamento, força mínima de escoamento ou comportamentos de histerese (Machado *et al.*, 2022).

Por fim, Materiais Tixotrópicos e Reopéticos, em especial, são fluidos que apresentam comportamentos distintos em resposta ao tempo e à taxa de deformação, apresentando um comportamento de histerese. Sendo opostos em seus comportamentos, fluidos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade ao serem submetidos a uma deformação constante ao

longo do tempo, enquanto isso, fluidos reopéticos tem um aumento da viscosidade quando sob uma deformação constante ao longo do tempo (Mezger, 2006).

Figura 14 – Comportamentos dos fluidos comparados ao Fluido Newtoniano



Fonte: Machado *et al.* (2022)

2.3.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

A análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é uma de duas análises de espectroscopia vibracional e é utilizada para identificação de grupos funcionais e estrutura das macromoléculas. O FTIR estuda a interação da matéria e radiação eletromagnética, as quais interagem através dos processos de absorção, emissão e espalhamento da radiação. As análises de FTIR podem ser realizadas em diferentes regiões do infravermelho ou, em alguns casos, nas três regiões, sendo o equipamento adaptado para cada uma das análises. Entretanto, este é composto, basicamente, por fonte de radiação, um interferômetro, um compartimento de amostra e um detector de radiação infravermelho (Canevarolo, 2004).

Para o processo de análise, uma radiação contínua é emitida por uma fonte, essa radiação é então dividida e sofre fenômenos de interferência, através de um espelho móvel, e, com o auxílio de um detector, forma-se um interferograma. O interferograma é então submetido a um equacionamento chamado transformada de Fourier, para obtenção do perfil espectral de intensidade versus número de ondas, também conhecido como espectro natural. Este espectro natural é então subtraído do espectro de feixe único da amostra, o qual corresponde a um somatório das características do equipamento, como fonte, espelhos e outros, e do ambiente no compartimento de análise, como a atmosfera de análise. Por fim, dessa subtração obtém-se o espectro de IR da amostra, o qual contém o valor de absorvância pelo número de ondas (Canevarolo, 2004).

2.3.3 Termogravimetria

A Termogravimetria (TG) é bastante utilizada na análise de polímeros desde a década de 1960. Esta análise térmica é baseada na variação de massa da amostra em função do tempo e da

temperatura e pode ser utilizada em análises de fenômenos físicos e químicos, como “avaliação da estabilidade térmica, o efeito de aditivos sobre a estabilidade térmica, a determinação dos conteúdos de umidade e de aditivos, os estudos de cinética de degradação, a análise de sistemas de copolímeros, a estabilidade a oxidação e muitas outras” (Canevarolo, 2004, pg. 223-224). O ensaio, que apresenta três modos de programação, pode resultar em dados quantitativos e empíricos, devido a dependência dos eventos térmicos em relação a fatores instrumentais e características da amostra (Canevarolo, 2004).

A análise de TG pode ser isotérmica, quasi-isotérmica ou dinâmica: a primeira é realizada à temperatura constante; a segunda, e intermediária, apresenta razão de aquecimento linear até a variação de massa, quando a temperatura passa a ser constante até um novo patamar e sucessivamente; a análise dinâmica, também conhecida como convencional, apresenta variações de temperaturas lineares (Canevarolo, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ENSAIO DE USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO

Nos experimentos realizados em campo, a máquina-ferramenta para usinagem por fluxo abrasivo bidirecional (*Extrude Hone*) opera realizando usinagem de matrizes e punções. A mesma trabalha com volume máximo de meio abrasivo 7L e volume utilizado de 5L, aproximadamente, entre 25°C e 50°C e sob demanda. O sistema foi parametrizado a uma pressão variável entre 95 e 100 bar, é abastecido de meio abrasivo (*Hontech*), com composição conforme a Tabela 1, sem massa e percentual mássico especificados pelo fabricante.

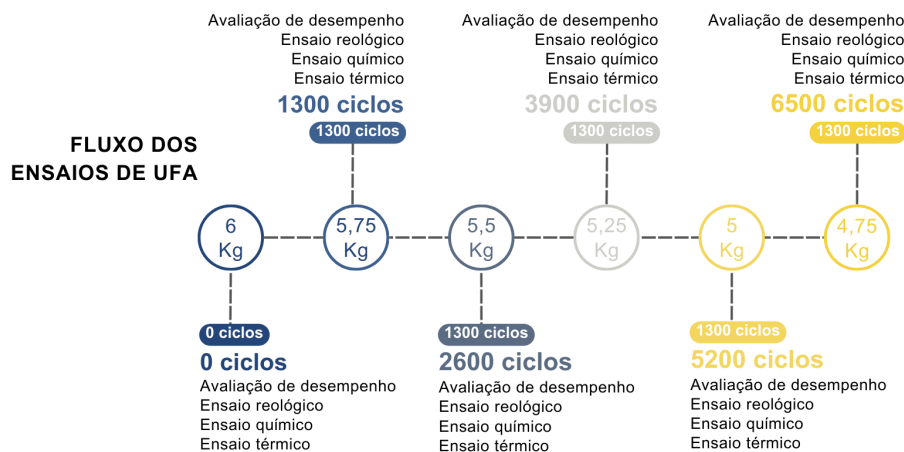
Tabela 1 – Composição do meio abrasivo

| Grupos Funcionais |
|-------------------------------|
| Carbeto de Silício |
| Polyborosiloxane |
| Graxa Lubrificante |
| Óleo Mineral Branco |
| Siloxanos |
| Silicones di-Me |
| Produtos de reação com Sílica |
| Ácido Oleico |

Fonte: Hontech

Considerando um ciclo o movimento do meio abrasivo através da área de usinagem em uma direção, positiva ou negativa, a usinagem das peças procedeu até que o meio abrasivo não tivesse mais as propriedades necessárias para realização da usinagem, seguindo indicações da empresa parceira. Nesse intervalo, de aproximadamente 6500 ciclos, foram recolhidos dados referentes aos ciclos e sua duração e também usinadas peças e retiradas amostras de meio abrasivo a cada, aproximadamente, 1300 ciclos, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama do fluxo dos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pela autora

3.2 RECOLHIMENTO DOS DADOS E AMOSTRAS

Durante o período de utilização do meio abrasivo adquiriram-se os seguintes dados para análises: tipo de ferramenta, duração da usinagem da peça e quantidade de ciclos realizados por peça. Os dados foram registrados em tabelas pelos operadores da máquina-ferramenta seguindo protocolo estabelecido para o experimento.

Com o propósito de avaliar a deterioração da qualidade da superfície das peças usinadas ao longo da perda de eficiência do meio abrasivo, um corpo de prova padronizado, conforme representado no desenho técnico do Apêndice A, foi inserido a cada intervalo aproximado de 1300 ciclos, conforme indicado na Figura 15. O corpo de prova é a última peça usinada antes da retirada do meio abrasivo, conforme detalhado no item subsequente. Dessa maneira, ao utilizar intervalos aproximadamente equivalentes de ciclos realizados, torna-se possível analisar a progressão do desgaste do meio abrasivo ao longo do tempo.

A preparação do corpo de prova padrão consiste em torneamento, seguido dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, e, por fim, eletroerosão de desbaste e acabamento. O corpo de prova, após preparação, foi então usinado sob as mesmas condições de pressão e temperatura descritas na Seção 3.1, e submetido a 30 ciclos de usinagem.

Com o propósito de estabelecer uma correlação entre a perda de eficiência do meio abrasivo e a deterioração de suas propriedades químicas e/ou reológicas, após a usinagem do corpo de prova padrão, em intervalos iguais de tempo, conforme ilustrado na Figura 15, coletaram-se amostras de 250g do meio abrasivo. Estas amostras foram armazenadas em embalagens de 200g para os ensaios reológicos, enquanto que 50g são separados para os ensaios químico e térmico.

Como demonstrado na Figura 15, o ensaio iniciou com 6kg de meio abrasivo e a cada intervalo de aproximadamente 1300 ciclos, são retirados 250g do meio abrasivo. Desse modo, o ensaio é encerrado com 4,75kg de meio abrasivo, sendo que as últimas peças usinadas foram processadas com 5kg do meio abrasivo, valor igual ao padrão utilizado pela empresa. O possível impacto da variação da quantidade de meio abrasivo presente na máquina-ferramenta não será discutido nesse trabalho.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.3.1 Caracterização da duração e quantidade total de ciclos do ensaio

A caracterização da duração e quantidade total de ciclos do ensaio consistiu em analisar, através das informações descritas na Seção 3.2, o tempo total de ensaio, bem como do total de ciclos ao qual o meio foi submetido. Para tal análise foram considerados, todos os ciclos, de ambas matrizes e punções, assim como os corpos de prova. Desta forma, possibilita-se uma visão geral precisa da perda de eficiência do meio abrasivo, além de comparações com estudos semelhantes encontrados na literatura.

A análise do tempo total de ensaio consiste no somatório da diferença entre a hora de

término e hora de início do processo de usinagem de todos os ciclos de usinagem, conforme Equação (1). Enquanto a análise da quantidade total de ciclos é um somatório do número total de ciclos, sem considerar o tempo de duração dos mesmos.

$$t_e = \sum (H_t - H_i) \quad (1)$$

Onde:

t_e = Tempo total de ensaio (h)

H_t = Hora de término (h)

H_i = Hora de início (h)

3.3.2 Caracterização da variação do fluxo do meio abrasivo

Utilizando também as informações coletadas conforme descrito na Seção 3.2, foram plotados dois gráficos, o gráfico de tempo por ciclo de usinagem e o gráfico de número de ciclos de usinagem por amostra. Ambos possuem o intuito de descrever o comportamento do meio abrasivo no processo de usinagem e sua possível variação de acordo com a perda de eficiência.

O gráfico tempo por ciclo de usinagem se divide entre matrizes e punções, além de não considerar os corpos de prova descritos na Seção 3.2. Esta análise avalia o tempo de duração de um ciclo ao longo do ensaio, tendo como objetivo determinar se a perda da eficiência do meio abrasivo pode ser relacionada a um aumento do tempo de duração dos ciclos.

Desta forma, tempo por ciclo de usinagem foi calculado a diferença entre a hora de término e hora de início do ciclo e este valor é dividido pela quantidade de ciclos a qual a peça foi submetida, conforme a Equação (2):

$$t_c = \frac{H_t - H_i}{N_c} \quad (2)$$

Onde:

t_c = Tempo de usinagem por ciclo (h)

H_t = Hora de término (h)

H_i = Hora de início (h)

N_c = Número de ciclos

3.3.3 Caracterização da qualidade da superfície das peças usinadas

O segundo gráfico plotado com os dados coletadas conforme descrito na Seção 3.2, diz respeito ao número de ciclos de usinagem por amostra, também dividida entre matrizes e punções e não considera os corpos de prova descritos na Seção 3.2.

O objetivo desta análise foi avaliar a variação da quantidade de ciclos necessários para que as peças produzidas pela empresa atinjam uma rugosidade R_a inferior a $0,1\mu\text{m}$, de acordo com seu critério interno. Assim, pode-se avaliar se a perda da eficiência do meio abrasivo pode ser relacionada a um aumento da quantidade de ciclos necessários para obtenção de uma mesma

qualidade de superfície e, conseqüentemente, uma piora da qualidade da superfície usinada. Motivo este que não foram considerados os corpos de prova descritos na Seção 3.2, pois os mesmos tinham como intuito avaliar a variação da rugosidade para uma mesma quantidade de ciclos, tornando estas peças inválidas para o gráfico em questão.

Além do gráfico supracitado, todos os corpos de prova produzidos para este estudo, conforme descrito na Seção 3.2, foram submetidos à caracterização por meio de medidas dos parâmetros de rugosidade das peças. A medição da rugosidade foi conduzida utilizando um rugosímetro (*Mitutoyo SJ-301 Absolute*), o qual realizou medições em dois pontos equidistantes (0° e 180°) e a duas alturas ao longo da profundidade da peça, 0 e 13,3mm, tanto antes quanto após o processo de UFA, permitindo a comparação dos valores. Os parâmetros de rugosidade que foram avaliados nos corpos de prova são: R_a , R_q , R_{vk} , R_{pk} e R_z .

Após a medição de tais parâmetros de rugosidade, a primeira etapa foi realizar a média das medições equidistantes, como mostrado na Equação (3), tal cálculo foi realizado para todos os parâmetros de rugosidade inicial e final da peça, em ambas as alturas de medição. Com os valores médios calculados, foi realizado um cálculo de variação percentual para cada um dos parâmetros individualmente, também em ambas as alturas. Dessa forma, com o intuito de considerar possíveis variações de rugosidade inicial desenvolveu-se a variação percentual de rugosidade, na qual a rugosidade inicial da peça foi subtraída da rugosidade final da peça e o valor dividido pela rugosidade inicial, como pode ser visto na Equação (4). Por fim, os valores encontrados foram plotados graficamente.

$$R_{media} = \frac{R_0 + R_{180}}{2} \quad (3)$$

Onde:

R_{media} = Rugosidade média entre medições equidistantes (μm)

R_0 = Rugosidade medida a 0° (μm)

R_{180} = Rugosidade medida a 180° (μm)

$$R_{VPR} = \frac{R_f - R_i}{R_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

R_{VPR} = Variação Percentual das Rugosidades (μm)

R_f = Rugosidade Inicial (μm)

R_i = Rugosidade Final (μm)

3.3.4 Caracterização reológica do meio abrasivo

Para a caracterização reológica do meio abrasivo foram utilizadas as amostras de 200g descritas na Seção 3.2. Tais amostras foram submetidas aos ensaios de Varredura de Frequência, Varredura de Tensão, Fluência e Recuperação e Rampa de fluxo *up & down*. As amostras

submetidas a zero ciclos (Amostra 00) e 6500 ciclos (Amostra 05), além das análises listadas, também foram submetidas as análises de Varredura de fluxo e Rampa de temperatura de fluxo.

As análises foram realizadas com a utilização de um reômetro (*TA Instruments, Discovery Hybrid Rheometer HR-2*) e todas as amostras foram ensaiadas a 25°C, utilizando um conjunto de pratos paralelos de 25mm de diâmetro e altura do *gap* de 2mm.

O ensaio de Varredura de Amplitude é um ensaio oscilatório, em que, a uma frequência constante tem-se uma variação de amplitude a uma tensão ou deformação controladas, sendo nesse caso, deformação. Este ensaio tem como principal objetivo determinar a Região de Viscoelasticidade Linear (LVER), a qual será utilizada nos demais ensaios. O valor de frequência utilizado é sugerido por Mezger (2006) para usuários do Sistema Internacional de Unidades (SI). Os valores de deformação foram selecionados de forma a abranger uma larga faixa de deformações (Mezger, 2006), ambos os valores podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Amplitude

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|----------------------|-------------|
| Frequência | 10Hz |
| Deformação | 0,01 a 100% |

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de Varredura de Frequência também é um ensaio oscilatório e, de forma quase oposta ao ensaio anterior, a uma amplitude constante, tem-se uma variação de frequência. Seu principal objetivo é caracterizar o comportamento viscoelástico do meio abrasivo, através do G' , G'' e η^* , demonstrando a variação desse comportamento de acordo com a variação da frequência. A frequência foi definida de forma a abranger uma larga faixa de comportamentos, porém sem tornar o ensaio demasiado lento, enquanto a deformação foi extraída do ponto a 50% do LVER, os valores podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Frequência

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|----------------------|-------------|
| Frequência | 0.1 a 100Hz |
| Deformação | 0.1% |

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de Fluência e Recuperação pode ser dividido entre carregamento e relaxamento. O carregamento ou fluência envolve aplicação de uma tensão constante, como mostrado na Tabela 4, após o carregamento, a tensão é removida e tem-se a fase de relaxamento ou recuperação. Durante o ensaio, a deformação da amostra é medida a fim de caracterizar sua deformação e recuperação. A tensão aplicada foi extraída do mesmo ponto a 50% do LVER.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no ensaio de Fluência e Recuperação

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|----------------------|---------|
| Tempo de Fluência | 300s |
| Tempo de Recuperação | 800s |
| Tensão | 80Pa |

Fonte: Elaborado pela autora

Após obtidos os resultados do ensaio de supracitado, foram calculadas as porcentagens elástica e viscosa das amostras através dos seus valores de deformação total e taxa de recuperação, conforme mostrado na Equação (5) e Equação (6).

$$Percetual_e = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_t} \times 100 \quad (5)$$

$$Percetual_v = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_e}{\varepsilon_t} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$Percetual_e$ = Percentual Elástico (%)

$Percetual_v$ = Percentual Viscoso (%)

ε_e = Deformação Total (rad)

ε_t = Deformação Elástica (rad)

O ensaio de Rampa de Fluxo *up & down*, caracteriza o comportamento tixotrópico ou reopético do material, conforme detalhado na Seção 2.3.1. Neste ensaio uma tensão crescente é aplicada e em seguida retirada em uma taxa de aumento e taxa de diminuição em forma de rampa. O tempo de aplicação das taxas, conforme sugerido pelo fabricante do equipamento, é descrito na Tabela 5, assim como a ordem de grandeza da força aplicada, a qual deve estar dentro do LVER.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no ensaio de Rampa de Fluxo *up & down*

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|------------------------------|-------------------|
| Tempo de aplicação da Tensão | 60s |
| Tempo de retirada da Tensão | 60s |
| Tensão | 0 a 10^{-4} MPa |

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de Varredura de Fluxo tem por objetivo caracterizar a curva de fluxo do material. Desta forma, uma deformação é aplicada e mantida por um intervalo de tempo, após esse intervalo de tempo, uma deformação de maior magnitude é aplicada e assim sucessivamente, ambos o tempo e deformação selecionados são apresentados na Tabela 6. Este intervalo entre as aplicações da deformação é necessário para que ocorra a recuperação elástica do material e seja possível realizar a medida apenas da porcentagem viscosa do material.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados no ensaio de Varredura de Fluxo

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|-----------------------|------------|
| Tempo para equilíbrio | 5s |
| Deformação | 0.1 a 100% |

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de Rampa de Temperatura de Fluxo foi realizado com o objetivo de compreender o comportamento do meio abrasivo sob diferentes temperaturas. As temperaturas inicial e final, conforme pode ser visto na Tabela 7, foram definidas de acordo com as temperaturas atingidas pelo meio abrasivo durante o processo de usinagem na empresa. A velocidade de rampa foi determinada próximo a sugestão do fabricante de 5°C/min, porém mais lenta para garantir que o meio abrasivo pudesse atingir de forma homogênea as temperaturas e, por fim, a taxa de cisalhamento foi extraída do mesmo ponto a 50% do LVER.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ensaio de Rampa de Temperatura de Fluxo

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|----------------------|---------------------|
| Temperatura Inicial | 25°C |
| Temperatura Final | 60°C |
| Velocidade de Rampa | 3°C/min |
| Taxa de Cisalhamento | 0,06s ⁻¹ |

Fonte: Elaborado pela autora

3.3.5 Caracterização da composição química do meio abrasivo

Para a caracterização química do meio abrasivo foram utilizadas parte das amostras de 50g descritas na Seção 3.2. A caracterização foi realizada por meio de análises de FTIR (*Bruker Tensor 27 IR*) através do método de Reflexão (ATR), com amostras preparadas em pastilhas de KBr e sem atmosfera controlada, os parâmetros do ensaio podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados no Ensaio de FTIR

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|----------------------|--|
| Resolução | 2cm ⁻¹ |
| Faixa Espectral | 4000cm ⁻¹ a 600cm ⁻¹ |
| Número de Varreduras | 6 varreduras |

Fonte: Elaborado pela autora

3.3.6 Caracterização térmica do meio abrasivo

Para a caracterização térmica do meio abrasivo foi realizada uma análise de TG (*STA 449 F3 Jupiter, Netzsch*) utilizando também as amostras de 50g descritas na Seção 3.2. Os ensaios

foram realizados nas amostras retiradas em todas as seis etapas do processo de UFA, utilizando um cadinho de Alumina e atmosfera de Nitrogênio. Os parâmetros do equipamento utilizados nesta análise podem ser vistos na Tabela 9, sendo a rampa de aquecimento definida próxima a temperatura mínima do equipamento de UFA e a temperatura máxima acima da temperatura de degradação do Polyborosiloxane, porém abaixo da temperatura de degradação de cerâmicas, de forma a possibilitar a análise da porcentagem de abrasivos presentes no meio.

Tabela 9 – Parâmetros utilizados no Ensaio de Termogravimetria

| Parâmetros de Ensaio | Valores |
|-----------------------------|----------------|
| Rampa de aquecimento | 30°C a 650°C |
| Taxa de aquecimento | 10°C/min |
| Vazão de gás | 20mL/min |
| Tempo de inertização | 30min |

Fonte: Elaborado pela autora

Durante a realização do ensaio de TG, o equipamento simultaneamente realizou o ensaio de Termogravimetria Derivada (DTG), o qual analisa a derivada primeira da variação da massa com a temperatura, proporcionando picos mais definidos. Dessa forma, a análise conjunta dos resultados da TG e sua curva derivada auxiliam na compreensão do fenômeno como um todo.

Com os resultados das análises também foi analisada a porcentagem de sólidos presente nas amostras, a qual, na Amostra 00, representa a porcentagem de abrasivos e nas amostras subsequentes representa a porcentagem de abrasivos e cavacos. Para tal, foram utilizados os últimos valores das análises de TG, os quais já estavam em porcentagem. Estes representam a porcentagem da amostra inicial que não foi consumida durante a análise, ou seja, que a temperatura de eliminação é superior a 650°C, como é o caso de metais e cerâmicas.

4 RESULTADOS

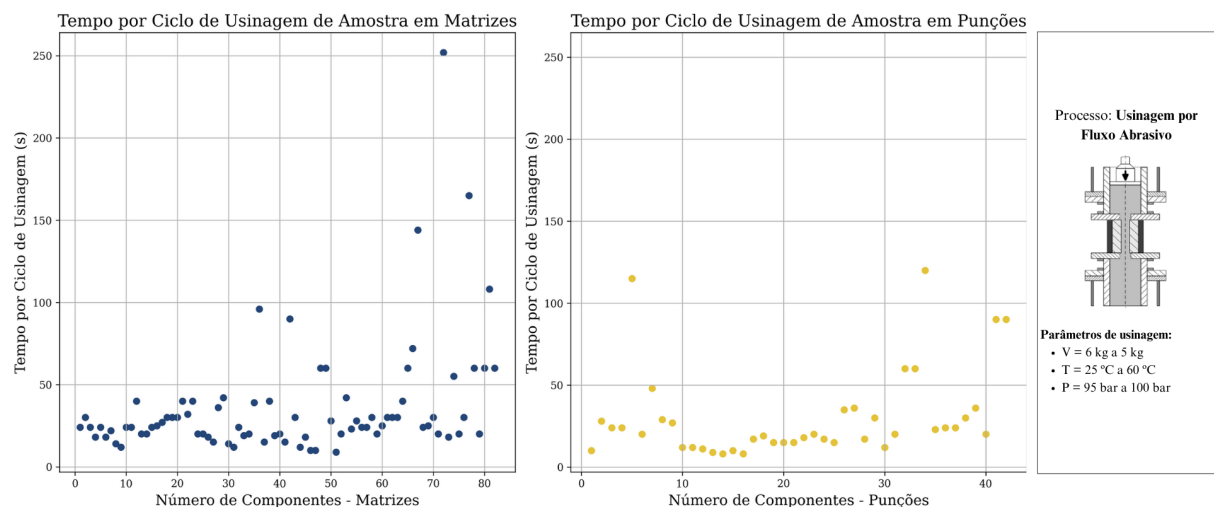
A caracterização geral do estudo, a fim de comparar este com estudos semelhantes da literatura, conforme descrito na Seção 3.3.1, contou com a análise do tempo total de usinagem e da quantidade total de ciclos realizados ambos até o desgaste completo do meio abrasivo. Desta forma, foi identificado que o tempo total de experimento foi de 80 horas e 40 minutos. Este tempo permitiu a realização de 6658 ciclos de usinagem.

No decorrer deste estudo foram identificados dois estudos semelhantes, os quais, trabalham com o mesmo polímero base, o Polyborosiloxane, e quantidade semelhante de abrasivos, entre 58 e 60%, entretanto, tais estudos foram desenvolvidos em laboratório, sob condições ideais de usinagem. Pode-se perceber que a utilização do meio abrasivo até seu esgotamento em ambiente fabril, atingiu apenas 80 horas e 40 minutos, como supracitado, ou seja, entre 20% e 25% do tempo de esgotamento em ambiente controlado, no qual atingiu-se 395 h e 420h, como mostram os estudos de Bremerstein, Höhn *et al.* (2014) e Bremerstein, Potthoff *et al.* (2015).

4.1 VARIAÇÃO DO FLUXO DO MEIO ABRASIVO

O gráfico do tempo por ciclo de usinagem de amostra, obtida com o tratamento dos dados, conforme mostrado na Figura 16 e permite observar que o tempo de usinagem das amostras apresenta dispersão entre uma amostra e outra, principalmente explicado pela variação do diâmetro de passagem do meio abrasivo e pela altura das amostras. Pode-se perceber também que há um pequeno aumento do tempo por ciclo próximo ao final do experimento, além de próximo ao final do experimento, principalmente nos ciclos de usinagem das matrizes, perceber-se um aumento na quantidade de picos, representando ciclos mais longos.

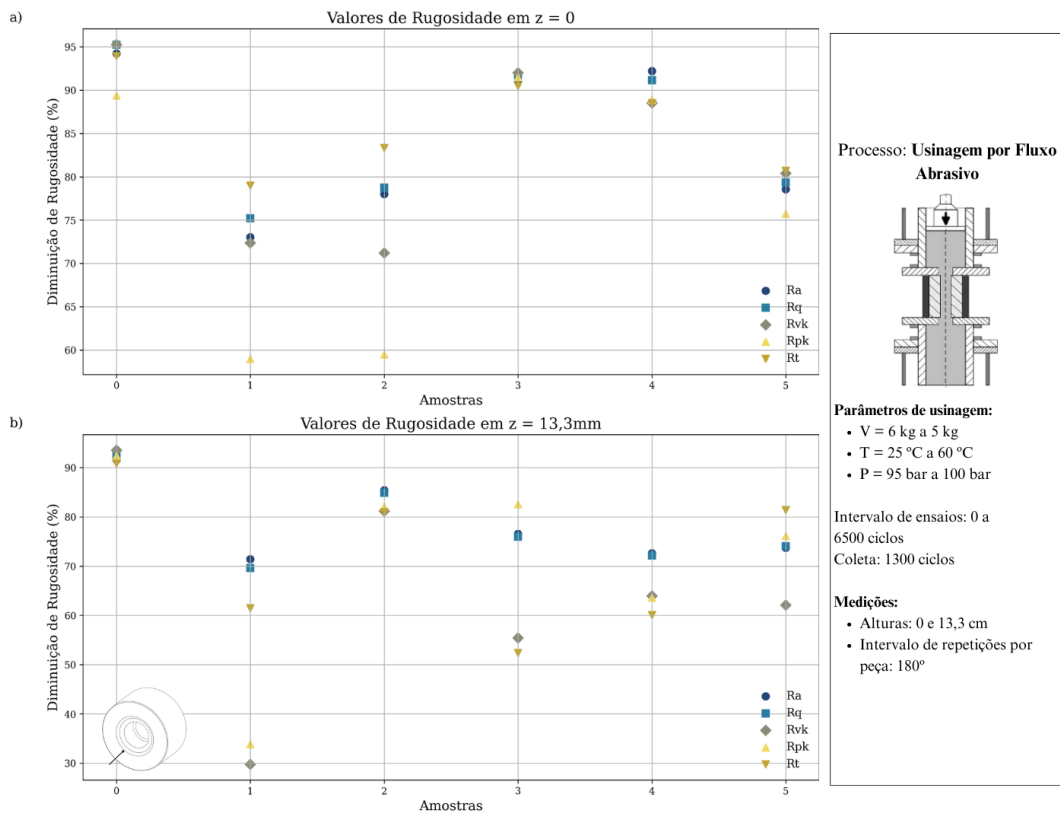
Figura 16 – Tempo por ciclo de usinagem de amostra



Fonte: Elaborado pela autora

capaz de gerar uma melhor qualidade de superfície que o mesmo em qualquer ponto de seu uso.

Figura 18 – Rugosidades dos corpos de prova em função da posição de medição: (a) altura igual a zero, (b) altura igual a 13,3 mm



Fonte: Elaborado pela autora

É possível observar também que, apesar do número de ciclos nas peças produzidas pela empresa não ter apresentado uma tendência de aumento com a perda de propriedades do meio abrasivo, como pode ser visto na Figura 17, a rugosidade dos corpos de prova produzidos para este estudo apresentou uma piora, como mostrado na Figura 18. Desta forma, levando em conta o bom controle de qualidade da empresa, pode-se considerar a possibilidade das peças usinadas com meio abrasivo novo ou semi-novo estarem sendo usinadas com mais ciclos do que o necessário para atingir a rugosidade R_a inferior a $0,1\mu\text{m}$ determinada pela empresa.

4.3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO MEIO ABRASIVO

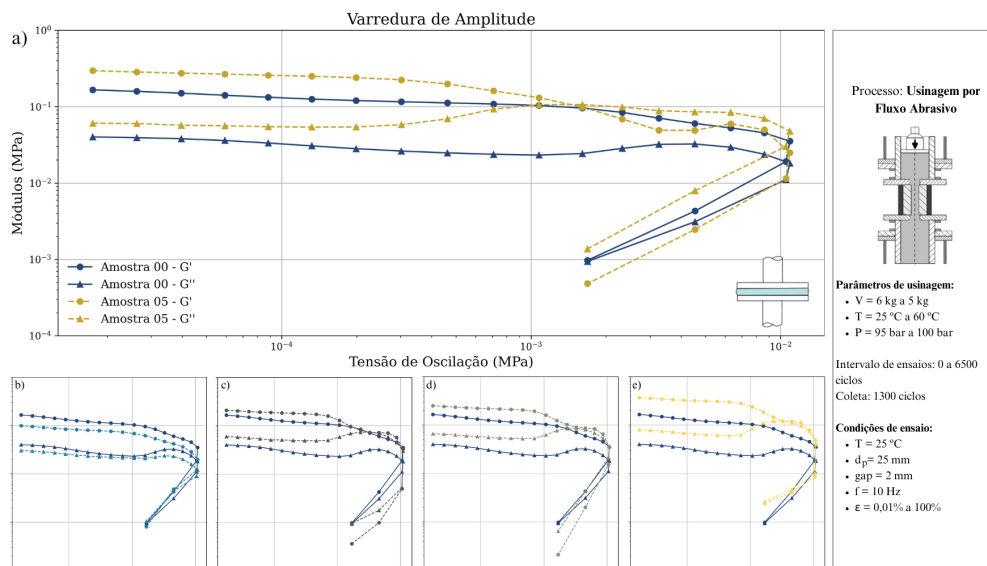
As análises reológicas foram realizada conforme os parâmetros descritos Seção 3.3.4. Foram realizados dois Ensaios Oscilatórios, sendo eles, Varreduras de Amplitude e Frequência, além do ensaio de Fluência e Recuperação e três Ensaios de Fluxo: Rampa de Fluxo *up & down*, Varredura de Fluxo e Rampa de Temperatura de Fluxo.

A análise de Varredura de Amplitude, que pode ser observada tanto na Figura 19 como, em detalhes, no Apêndice B, é utilizada para determinar o LVER da amostra, ou seja, a faixa

de amplitudes em que a relação entre a tensão e deformação são lineares e, desta forma, seu comportamento é previsível. Observando os gráficos é possível perceber que não se tem alteração desse limite, o qual vai até aproximadamente 10^{-2} MPa, ou seja, as amostras não apresentaram aumento ou diminuição da faixa ideal de tensão de trabalho.

Entretanto é possível observar que há um deslocamento nos valores dos módulos, os quais diminuem após 1300 ciclos (Amostra 01) e, na sequência, a partir de 2600 ciclos (Amostra 02) começam a aumentar. Desta forma, entre 1300 e 2600 ciclos o material apresenta um comportamento simultaneamente menos rígido e menos viscoso. Após 2600 ciclos, o material passa a apresentar um comportamento simultaneamente mais rígido e mais viscoso, quando comparado tanto com a Amostra 01 (1300 ciclos) como com a Amostra 00 (zero ciclos).

Figura 19 – Varredura de Amplitude das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04



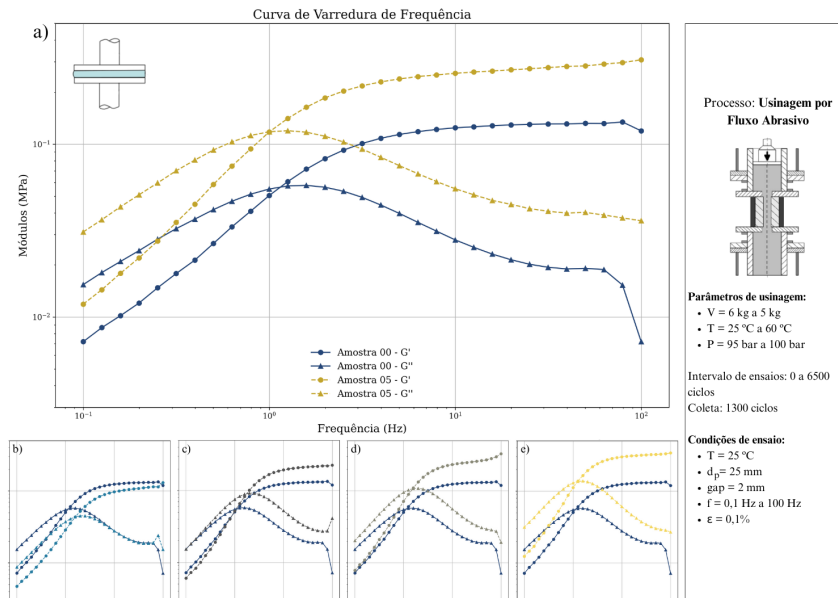
Fonte: Elaborado pela autora

Ainda em relação a Figura 19, também a partir de 2600 ciclos pode-se observar que os módulos começam a se aproximar, se cruzando próximo ao limite do LVER. Este cruzamento, também conhecido como *crossover*, indica um equilíbrio entre a capacidade do material de armazenar e dissipar energia, ou seja, nesse ponto as contribuições elásticas e viscosas do material são iguais, até o momento em que ocorre a transição no comportamento viscoelástico do material. Essa transição pode indicar uma transição sol-gel ou outras mudanças estruturais ou de fase do material.

A análise de Varredura de Frequência apresenta a variação do comportamento elástico e viscoso da amostra relacionado a frequência de aplicação do esforço. Ao observar a Figura 20 e, de forma mais detalhada, o Apêndice C, percebe-se que o G' da Amostra 00 (zero ciclos) é maior que o da Amostra 01 (1300 ciclos) para todas as frequências analisadas, indicando que o

polímero novo tem uma maior rigidez. Ao mesmo tempo, G'' também é maior para a amostra nova, sugerindo que ela também tem uma maior capacidade de dissipação de energia.

Figura 20 – Varredura de Frequência das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04



Fonte: Elaborado pela autora

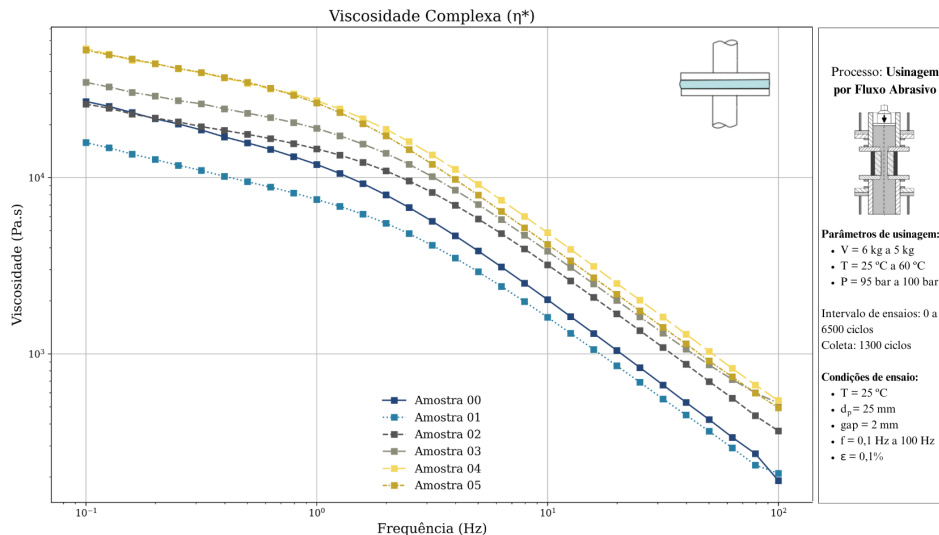
Ao observarmos a Amostra 02 (2600 ciclos), comparada a Amostra 00 (zero ciclos), percebe-se que o G' da Amostra 02 inicia menor que o da Amostra 00, ou seja, com comportamento semelhante a Amostra 01 (1300 ciclos), tem-se então um ponto em que ambos são iguais e uma inversão nas frequências maiores. Desta forma, inicialmente a Amostra 02 apresenta menor rigidez que a Amostra 00, até que em certa frequência, sua rigidez se iguala e, por fim, a Amostra 02 passa a apresentar maior rigidez que a Amostra 00. Ao mesmo tempo, o G'' da Amostra 02 supera a Amostra 00 para todas as frequências, ou seja, a Amostra 02 possui maior capacidade de dissipação de energia que a Amostra 00. A partir da Amostra 03 (3900 ciclos) ambos os módulos (G' e G'') são superiores aos da Amostra 00, para todas as frequências, indicando que esta possui ambas rigidez e capacidade de dissipação de energia superiores.

O ponto de cruzamento entre G' e G'' , é conhecido como a frequência de transição, na qual o comportamento do material muda de predominantemente viscoso ($G'' > G'$) para predominantemente elástico ($G' > G''$). Percebe-se que este ponto de cruzamento diminui na Amostra 01 (1300 ciclos), comparado à Amostra 00, seguido de um aumento nas Amostras 02 e 03 (2600-3900 ciclos) e uma diminuição nas Amostras 04 e 05 (5200-6500 ciclos).

A viscosidade complexa combina aspectos elásticos e viscosos, fornecendo uma visão abrangente das propriedades viscoelásticas do material e permitindo entender como o material responde a diferentes frequências de deformação. Assim, percebe-se que a viscosidade complexa, a qual pode ser calculada através de G' e G'' , teve comportamento semelhante a eles, com uma

diminuição na Amostra 01 (1300 ciclos), seguido de aumento de seu valor, a partir da Amostra 02 (2600 ciclos) até a 04 (5200 ciclos). Por fim, a Amostra 05 (6500 ciclos), apesar de ainda superior a Amostra 00 (zero ciclos), percebe-se que essa apresenta comportamento semelhante a Amostra 04, sendo para algumas frequências levemente inferior a Amostra 04.

Figura 21 – Viscosidade Complexa



Fonte: Elaborado pela autora

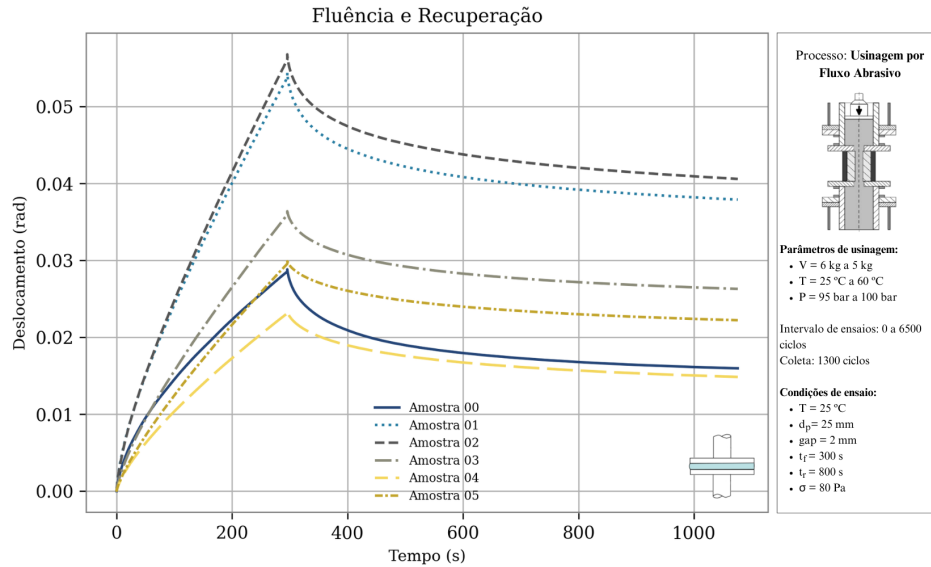
Dessa forma, pode-se interpretar que nas análises anteriores, inicialmente as cadeias poliméricas podem sofrer uma certa relaxação ou rearranjo. Isso ocorre devido à quebra inicial de ligações secundárias, relaxação das tensões internas ou perda de plastificante, o que pode resultar em uma diminuição na rigidez (G') e na capacidade de dissipação de energia (G''). Em seguida, observa-se um processo de envelhecimento e degradação do polímero, o qual pode resultar do aumento da cristalinidade, formação de redes de reticulação, degradação, oxidação ou fadiga mecânica, resultando em um aumento dos módulos. Sendo importante destacar a Amostra 02 (2600 ciclos), a qual, como pode ser visto de forma detalhada na análise de Varredura de Frequência, apresenta um comportamento de transição entre os expostos acima.

No ensaio de Varredura de Frequência, mostrados na Figura 20, em comparação aos estudos supracitados realizados em laboratório, observa-se que a diferença entre os G' e G'' de cada amostra individualmente é superior para os ensaios deste trabalho. Em relação à diferença entre o meio abrasivo novo e usado, este trabalho também obteve grande variação, superior ao apresentado nos artigos, além destes não mostrarem o comportamento de transição entre relaxação e degradação avaliado no presente trabalho. Não serão comparados valores dos módulos G' e G'' , uma vez que a diferença de parâmetros de ensaio pode ter influência nos mesmos.

A análise de Fluência e Recuperação, detalhada na Seção 2.3.1, apresentou, para a sequência de amostras, um aumento no deslocamento para uma mesma tensão aplicada entre as Amostras 01 (1300 ciclos) e 02 (2600 ciclos), seguida de uma diminuição desse deslocamento a partir da Amostra 03 (3900 ciclos) conforme mostrado no Figura 22. Através da inclinação das

curvas de fluência, percebe-se também que as Amostras 01 e 02 apresentam maior inclinação inicial, fato que somado a maior deformação comprovam a menor resistência a fluência dessas amostras, comparado as Amostras 00, 03, 04 e 05 (6500 ciclos). Pode-se observar também que a Amostra 05 teve uma maior resistência a fluência quando comparado a Amostra 04, sendo sua deformação muito semelhante a da Amostra 00, porém com menor capacidade de recuperação.

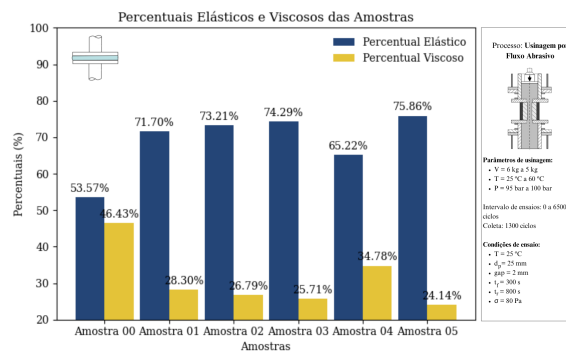
Figura 22 – Fluência e Recuperação



Fonte: Elaborado pela autora

Ao calcular os percentuais elásticos e viscosos das amostras, foi possível observar um aumento do percentual elástico, com comportamento oposto para o percentual viscoso, como mostrado na Figura 23. Entretanto, percebe-se que a Amostra 04 (5200 ciclos) apresenta uma pequena diminuição do percentual elástico, comparada as amostras anteriores.

Figura 23 – Percentuais elásticos e viscosos



Fonte: Elaborado pela autora

No ensaio de Fluência e Recuperação, observa-se também que, ambos os artigos, mostram apenas o aumento da porcentagem elástica do meio, com diminuição da capacidade de

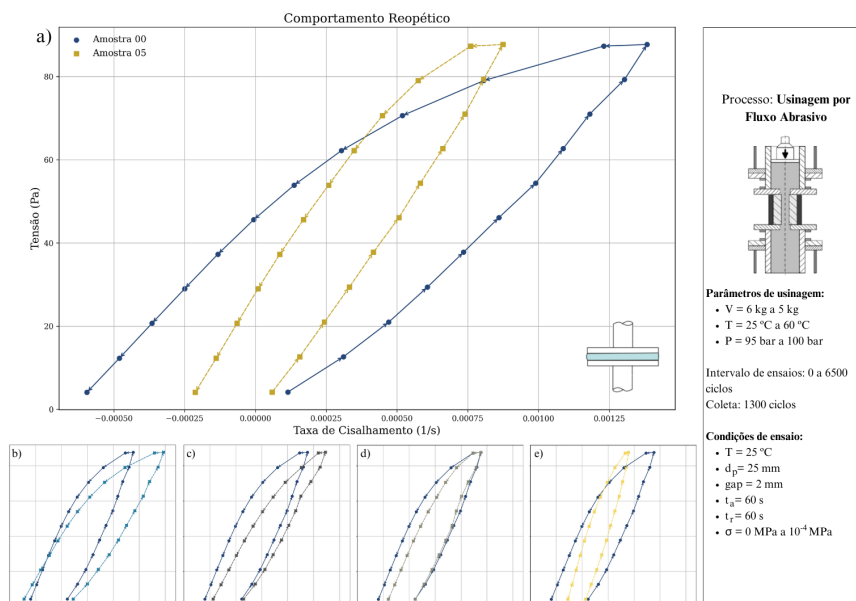
estiramento do material. Comparado ao apresentado nesse trabalho, na Figura 23, obteve-se um aumento seguido de uma diminuição do percentual elástico, entretanto, assim como nos artigos, o percentual elástico das amostras usadas são mais elevados que do material novo. Em relação ao estiramento da curva, mostrado na Figura 22, observou-se primeiramente um aumento do mesmo, seguido de sua diminuição, comportamento que não é detalhado nos artigos.

Em relação ao processo de usinagem a proporção elástica do meio abrasivo auxilia principalmente na atuação de forças normais, enquanto a proporção viscosa auxilia na força axial e na remoção de material. Assim, avaliando os ensaios dinâmicos anteriormente destacados, percebe-se que durante o processo de desgaste do meio abrasivo, inicialmente ocorre uma diminuição de ambas as forças de usinagem, comparado ao meio abrasivo novo, seguida de um aumento de tais forças. Ou seja, comparado a amostra nova, inicialmente tanto a penetração do grão é menor, quanto o deslocamento de material é menor, e, na sequência, tem-se um aumento de ambos, a penetração e o deslocamento de material.

Paralelo a esta análise, através do ensaio de fluência e recuperação, observa-se também um aumento quase contínuo da proporção elástica do meio abrasivo. Ou seja, observa-se uma deterioração da capacidade do meio abrasivo fluir e se deformar, além de um aumento da força normal em relação a força axial. Este aumento da força normal em relação a axial resulta em indentações mais profundas e uma qualidade de superfície inferior.

A rampa de Fluxo *up & down* é utilizada para caracterizar o comportamento de histerese de um fluido, auxiliando na compreensão da variação da viscosidade de um material sob diferentes taxas de cisalhamento, essa análise pode ser observado na Figura 24, ou em detalhes no Apêndice D.

Figura 24 – Rampa de Fluxo *up & down* das Amostras (a) 00 e 05 (b) 00 e 01 (c) 00 e 02 (d) 00 e 03 (e) 00 e 04



Fonte: Elaborado pela autora

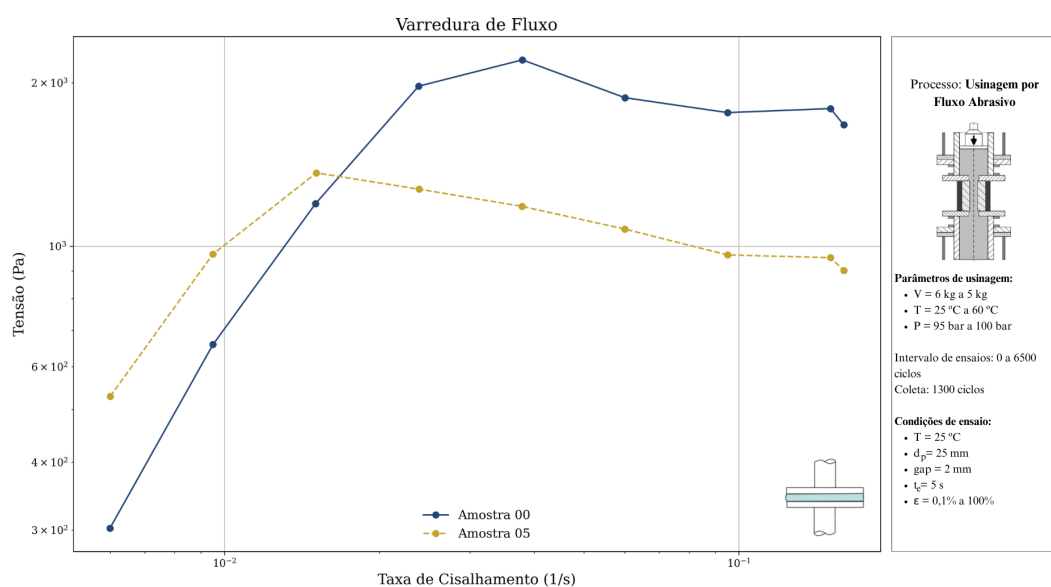
Pode-se observar que o fluido apresenta comportamento reopético, ou seja, sua viscosidade aumenta com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante. Isso ocorre devido a partículas ou moléculas internas que interagem de maneira a criar uma estrutura mais rígida ao longo do tempo.

Observando o Apêndice D também percebe-se que na Amostra 01 (1300 ciclos), comparada a Amostra 00 (zero ciclos), a curva deloca-se atingindo maiores taxas de cisalhamento, indicando que o material se torna mais resistente ao cisalhamento. Na curva da Amostra 02 (2600 ciclos), percebe-se que há uma tendência do material em retornar a menores taxas de cisalhamento ao mesmo tempo que há uma diminuição na histerese do material, comportamento que também se observa nas demais amostras.

Assim, observando a Figura 24, percebe-se que a histerese do fluido diminui consideravelmente com seu uso, além da diminuição nas taxas de cisalhamento. Isso indica que o material está dissipando menos energia durante os ciclos de carregamento e descarregamento e também se torna menos resistente ao cisalhamento.

A Varredura de Fluxo mostra o comportamento viscoso do material quando submetido a uma taxa de cisalhamento. Conforme mostrado na Figura 25, o meio abrasivo apresenta comportamento pseudoplástico, ou seja, quando submetido a uma deformação, suas longas moléculas ou estruturas complexas se alinham na direção do fluxo, reduzindo a resistência interna e, conseqüentemente, a viscosidade. Dessa forma, quanto mais rápido ou intensamente o material é agitado ou deformado, mais fácil ele flui.

Figura 25 – Varredura de Fluxo das Amostras 00 e 05



Fonte: Elaborado pela autora

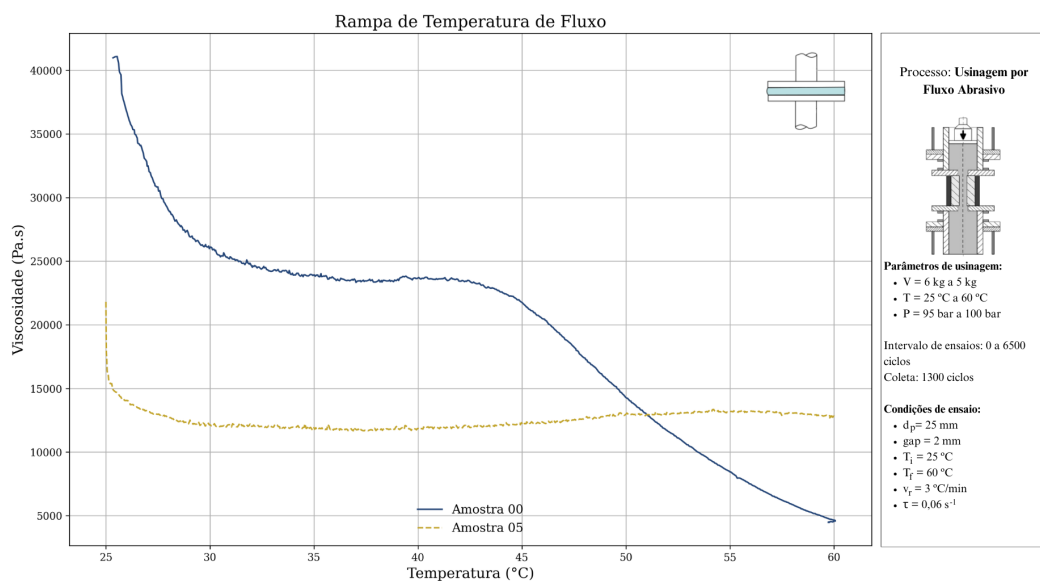
Pode-se observar também que, a Amostra 05 (6500 ciclos) mostra um aumento inicial na tensão com a taxa de cisalhamento, seguido por uma queda mais acentuada comparada à Amostra 00 (zero ciclos). Isso indica que o material usado sofreu alterações estruturais que resultaram em

uma menor resistência ao cisalhamento, ou seja, pode ter ocorrido uma degradação da estrutura interna do material ou a quebra de ligações intermoleculares que originalmente contribuíam para uma maior viscosidade no material.

A Rampa de Temperatura de Fluxo relaciona a viscosidade do meio abrasivo com sua temperatura de uso, esta pode ser observada na Figura 26. É possível observar que a amostra nova apresenta elevada viscosidade próximo a temperatura inicial de uso (25°C), com uma rampa acentuada entre 25°C e 30°C. Também é possível observar um patamar de viscosidade aproximadamente constante entre 30°C e 45°C, sendo a última a temperatura máxima de uso recomendada pelo fabricante. Após 45°C percebe-se uma diminuição acentuada da viscosidade, justificando de forma experimental a sugestão de uso do fabricante.

Entretanto, percebe-se que com o uso o comportamento de tal material muda completamente. Este passa a apresentar uma pequena queda na viscosidade próximo a 25°C, porém, a partir deste ponto, a curva praticamente não apresenta alteração, sendo a viscosidade do material em seu fim de vida muito mais constante entre 25°C e 60°C do que em seu início de vida. Assim, percebe-se que próximo ao fim de vida da massa sua utilização em temperaturas mais elevadas não apresenta problemáticas tais quais em seu início de vida.

Figura 26 – Rampa de Temperatura de Fluxo das Amostras 00 e 05



Fonte: Elaborado pela autora

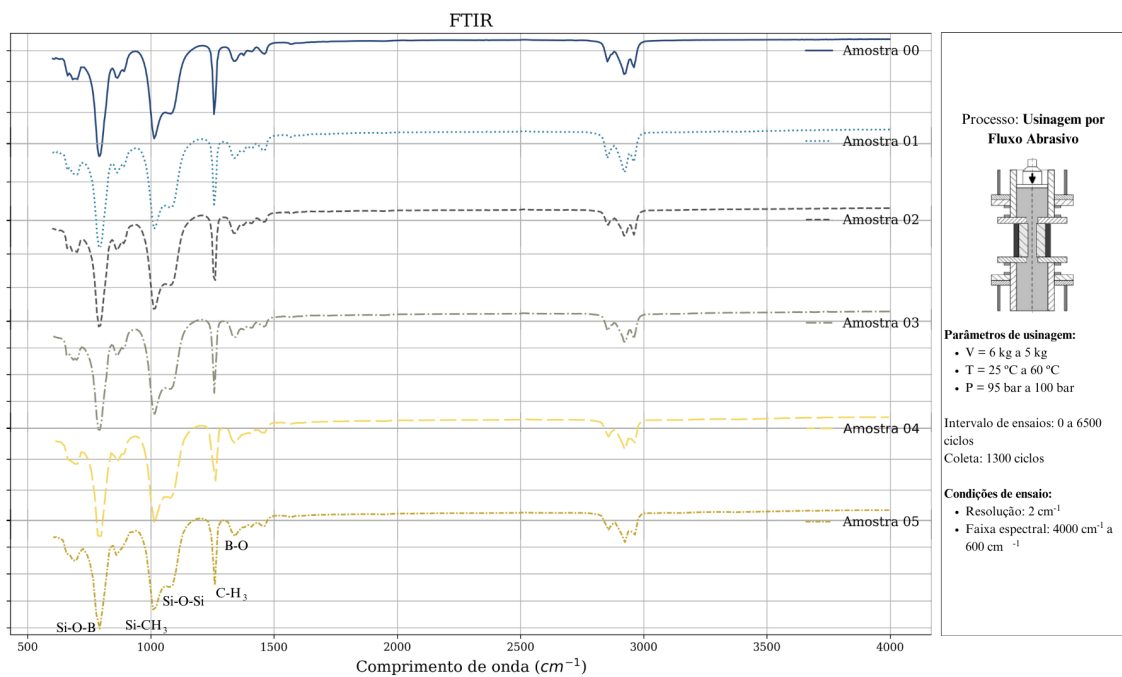
Percebe-se que o material apresenta tanto comportamento pseudoplástico como reopético, além de ter sua viscosidade variável com a variação de temperatura. Ou seja, a viscosidade do fluido diminui com o aumento da taxa de cisalhamento e aumenta ao longo do tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, além de diminuir com o aumento da temperatura. Dessa forma, sua viscosidade varia tanto com a taxa de cisalhamento quanto com o tempo e com a temperatura, exibindo uma combinação única de propriedades reológicas. Tais características também são influenciadas pela perda de propriedades do meio abrasivo. Dessa forma a determinação dos

parâmetros de controle de processo mais adequados, assim como qualquer simulação tornam-se complexos.

4.4 GRUPOS FUNCIONAIS QUE COMPÕEM O MEIO ABRASIVO

A análise de FTIR é apresentada na Figura 27. Pode-se observar que as principais ligações do Polyborosiloxane podem ser encontradas no espectro, assim como ligações do mesmo com grupos funcionais radicais metil, possivelmente provenientes dos plastificantes. Também observa-se que não foi possível detectar alterações químicas significativas durante o processo de perda das propriedades do meio abrasivo, uma vez que os picos presentes se mantiveram constantes durante o período analisado.

Figura 27 – FTIR



Fonte: Elaborado pela autora

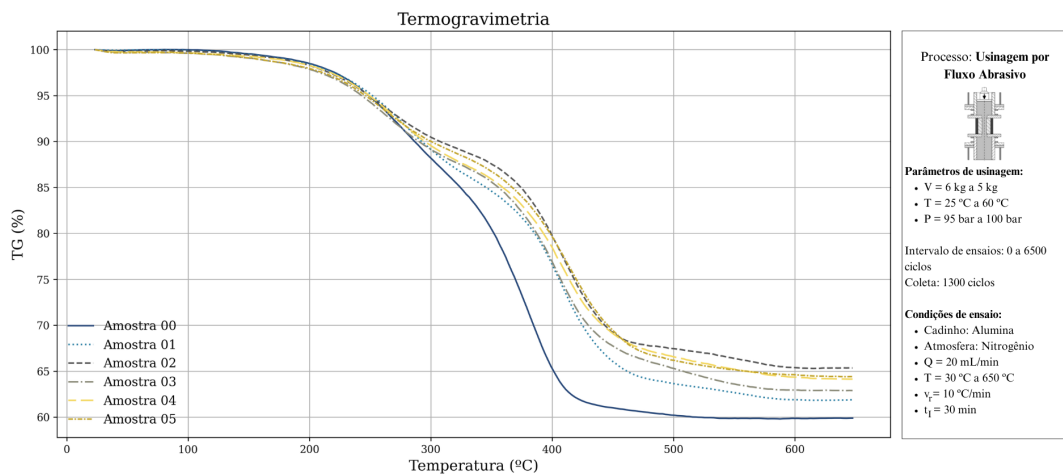
Aproximadamente entre 2800cm^{-1} e 3000cm^{-1} pode-se observar picos não identificados na Figura 27, estes possivelmente correspondem a alcanos, alcenos, aldeídos ou grupos aromáticos. Entretanto, devido a presença de grande parte desses grupos funcionais no polímero e a falta de citações e informações mais precisas, a exata identificação não foi possível.

4.5 TEMPERATURA DE DEGRADAÇÃO DOS GRUPOS FUNCIONAIS

A curva de TG mostrada na Figura 28 possui seus parâmetros de ensaio apresentados na Seção 3.3.6. Ela mostra, através da análise da Amostra 00 (zero ciclos), um polímero de elevada rigidez, o qual permanece estável até atingir a temperatura de transição vítrea, em

aproximadamente 220°C. Percebe-se que, com a utilização do meio abrasivo, o mesmo perde parcialmente sua estabilidade, como pode ser melhor visualizado na Figura 29, além de apresentar um aumento na porcentagem de sólidos, como detalhado na Figura 30. Entretanto, é importante destacar a curva da Amostra 02 (2600 ciclos), a qual, como pode ser observado, apresenta uma maior temperatura de degradação que as demais. Isso pode ocorrer devido a maior presença de sólidos, como explicado posteriormente, que afetam a rede cristalina ao deformá-la e consequentemente afetam a estabilidade térmica da amostra.

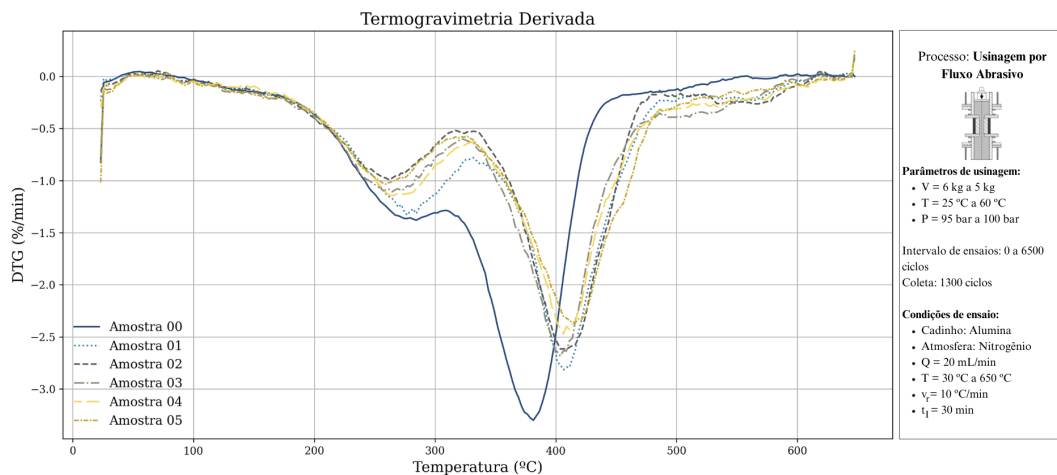
Figura 28 – Termogravimetria



Fonte: Elaborado pela autora

A DTG é uma análise que avalia a derivada da curva de TG, nessa análise, complementar a anterior, é possível identificar eventos de decomposição que podem estar sobrepostos, além de visualizar de forma clara as temperaturas em que ocorrem as maiores taxas de perda de massa e separar essas reações, essa análise pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 – Termogravimetria Derivada



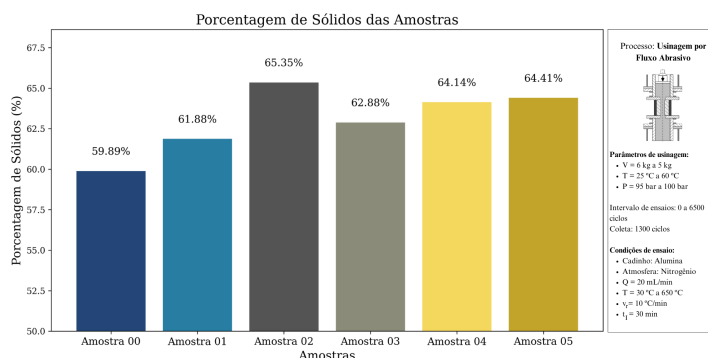
Fonte: Elaborado pela autora

Através da Figura 29, percebe-se de forma clara que a Amostra 00 (zero ciclos) apresenta uma curva com um grande pico negativo entre 350°C e 400°C, indicando uma significativa perda de massa, precedida por uma perda de massa de menor intensidade entre 250°C e 300°C.

Isso sugere que o polímero novo é estável e se decompõe rapidamente nesta faixa de temperatura, iniciando a perda de massa possivelmente pelo plastificante e na sequência o polímero base. Nas amostras posteriores percebe-se variações na faixa de temperatura de decomposição, além da maior distribuição da decomposição, indicando que o polímero perdeu estabilidade térmica devido ao uso prolongado, resultando em uma decomposição mais gradual.

Através da TG também é possível estimar a porcentagem de cerâmicos e metais presentes em um polímero, tal cálculo é baseado na porcentagem de massa ainda presente após o ensaio. Assim, como pode ser visto na Figura 30, percebe-se que o volume de abrasivos cerâmicos presente no meio abrasivo sem uso é de 59,89%, um valor um pouco superior a faixa de 15 a 50% ao sugerido por Bremerstein, Potthoff *et al.* (2015), como exposto na Seção 2.2, porém semelhante aos 58,4% utilizados em ambos os trabalhos de Bremerstein, Potthoff *et al.* (2015) e Bremerstein, Höhn *et al.* (2014).

Figura 30 – Porcentagem de sólidos



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se observar que esse valor percentual de sólidos aumenta, devido à absorção de cavacos pelo meio abrasivo, até chegar ao valor de 64,41%. Entretanto, observa-se que, na Amostra 02 (2600 ciclos), temos um valor relativamente elevado comparado as demais amostras, isso se deve, possivelmente, ao fato da amostra utilizada no ensaio ser de apenas 10mg, conforme descrito na Seção 3.3.6, e a distribuição de abrasivos no meio polimérico não ser uniforme, perceptível também devido ao fato dos resultados de sua análise reológica não se destacarem dos demais. Assim, é possível que a amostra analisada tenha uma quantidade superior de abrasivos quando comparada a totalidade do meio polimérico nesse estado de uso.

Em relação à temperatura de trabalho do meio abrasivo, a qual varia entre 25°C e 60°C segundo a empresa, é possível observar dois pontos relevantes a este estudo. Primeiramente, como pode ser visto na Figura 26, a temperatura utilizada pela empresa altera profundamente a viscosidade do meio abrasivo novo, influenciando diretamente a eficiência do processo e a

qualidade do produto final, fato que não é observado no meio abrasivo usado. Em relação a viscosidade, destaca-se também que apesar da mesma não sofrer alteração devido à temperatura no meio abrasivo já usado, percebe-se que suas características pseudoplásticas e tixotrópicas ainda apresentam influência em seu comportamento. Ou seja, a viscosidade do meio não é constante em nenhum momento, ela deixa de variar com a temperatura, mas ainda apresenta variação com tanto com a taxa de cisalhamento quanto com o tempo.

O segundo ponto a se levantar, já supracitado, é o fato da elevada temperatura acelerar o processo de desgaste do meio abrasivo, tornando seu esgotamento mais acelerado. Em relação ao esgotamento, percebe-se que a temperatura não age sozinha no processo de desgaste, pois como pode ser visto na Figura 28 a temperatura de transição vítrea do polímero é de aproximadamente 420°C. Ou seja, a temperatura atua como um elemento adicional de importante destaque nesse processo de desgaste, junto a outros outros elementos, como absorção de cavaco e fragmentação dos abrasivos.

Por fim, percebe-se que o polímero não apresentou alteração química, como mostrado na Figura 27, ao mesmo tempo que apresentou uma grande perda de estabilidade térmica, como pode ser visto na Figura 28. Isso pode ocorrer por uma série de fatores, a degradação térmica pode ser consequência de alterações físicas, como a quebra de ligações fracas ou a despolimerização, que não necessariamente alteram as principais ligações químicas. Também é possível que degradação térmica ocorra devido a absorção de resíduos sólidos ou carbonizados, como os cavacos, que não apresentam novas funcionalidades químicas, mas que alteram a estabilidade térmica do polímero. É possível, por último, que ocorra a degradações de componentes menores, de baixa massa molar, como plastificantes, ou em baixas concentrações que não são detectáveis pela FTIR, mas influenciam a degradação térmica.

5 CONCLUSÕES

Através deste trabalho pôde-se observar que o meio abrasivo perde suas propriedades, tanto reológicas quanto térmicas, porém mantém sua integridade química ao longo do seu processo de desgaste. Proporcionando grande campo de estudo, tanto no aprofundamento do entendimento de tal degradação, quanto com o intuito de retardá-la.

De forma geral, foi possível concluir que o meio abrasivo em ambiente fabril tem seu tempo de uso muito inferior quando comparado a sua utilização em ambiente controlado. Neste trabalho foi possível observar um tempo até o desgaste de 80 horas e 40 minutos, que representa apenas 20% a 25% do tempo observado em laboratório. Destaca-se também que os artigos no tema não explicitam a quantidade de ciclos realizados nesse tempo, entretanto este trabalho observou a realização de 6658 ciclos, com grande variação na duração de cada ciclo.

A análise da variação de fluxo deixa claro que o desgaste do meio abrasivo pode ser relacionado a um aumento do tempo por ciclo de usinagem, o qual, com maiores estudos poderia ser utilizado para descrever tal perda de propriedades.

Ao observar-se a qualidade da superfície usinada das peças produzidas pela empresa percebe-se que ocorreu uma alteração de 86% na quantidade de ciclos necessários para o acabamento. Entretanto, não foi possível verificar um aumento na quantidade de ciclos devido a perda de propriedades do meio abrasivo. Os corpos de prova fabricados para este estudo, tiveram sua rugosidade medida e apresentaram grande instabilidade nos parâmetros analisados. Tais amostras apresentaram diminuição da variação de rugosidade percentual R_a de 17% e 19% para as alturas de 0mm e 13,3mm, ou seja, observa-se diminuição da qualidade da superfície usinada ao longo do uso do meio abrasivo. Assim, são possíveis duas hipóteses: primeiramente que a qualidade da superfície usinada também possa ser utilizada para descrever tal perda de propriedades do meio polimérico; em segundo, pode-se estudar a possibilidade ajustar a quantidade de ciclos aos quais as peças são submetidas, com o intuito de otimizar o processo.

Em relação às propriedades reológicas percebe-se, nos ensaios oscilatórios, inicialmente uma diminuição de ambos os módulos de armazenamento e perda na Amostra 01 (1300 ciclos), quando comparada a Amostra 00 (zero ciclos), seguida de um aumento de ambos os módulos, a partir da Amostra 02 (2600 ciclos), sendo possível observar esse comportamento de transição dos módulos no ensaio de Varredura de Frequência em tal amostra. No ensaio de Fluência e Recuperação percebe-se uma diminuição da resistência a fluência nas Amostras 01 e 02, seguido de um aumento dessa resistência na Amostra 03 (3900 ciclos), com mesmo comportamento para o percentual viscoso das amostras. Por fim, nos ensaios de fluxo, percebe-se um material que apresenta variação da viscosidade tanto com a taxa de cisalhamento quanto com o tempo e com a temperatura, além da variação com a perda de propriedades do meio abrasivo.

Nas análises químicas, pode-se observar que os principais grupos funcionais que compõem o polímero não são afetados pelo desgaste do meio abrasivo. Assim, foi possível descartar a possibilidade de perda das propriedades reológicas devido à quebra de ligações químicas e

desgaste devido à degradação química. Desta forma, pode-se concluir que tanto a perda parcial da estabilidade do polímero, observada através das análises térmicas, quanto as alterações reológicas ocorrem devido a fatores físicos. Logo, possivelmente pode-se observar relaxação de tensões internas e perda de plastificante seguido de aumento da cristalinidade, formação de redes de reticulação, absorção de cavaco e fadiga mecânica.

Por fim, algumas sugestões de trabalhos futuros incluem: ampliar a vida do meio abrasivo; proporcionar formas sustentáveis de reciclagem do meio abrasivo; estudar o desgaste da partícula abrasiva; avaliar o desgaste do meio abrasivo sob diferentes condições de usinagem; explorar os impactos da alteração do comportamento tixotrópico do meio abrasivo no processo de usinagem; avaliar o impacto do desgaste do meio abrasivo na subsuperfície das peças, em especial peças submetidas a processos térmicos de usinagem de desbaste.

REFERÊNCIAS

Ansari, I. A.; Gupta, G. A.; Ramkumar, J.; Kar, K. K. Fly ash-mixed polymeric media for abrasive flow machining process. *In*: Kar, K. K. (Ed.). **Handbook of Fly Ash**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2022. P. 681–713. ISBN 978-0-12-817686-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817686-3.00003-7>.

Anton Paar. **Amplitude sweeps**. Disponível em: <https://wiki.anton-paar.com/en/amplitude-sweeps/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

_____. **Frequency sweeps**. Disponível em: <https://wiki.anton-paar.com/br-pt/varreduras-de-freuencia/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

Bremerstein, T.; Höhn, S.; Potthoff, A.; Blug, B.; Amann, T. Rheologisches Verhalten der beim Strömungsschleifen genutzten SiC-Suspensionen. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 86, n. 3, p. 262–269, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201300124>.

Bremerstein, T.; Potthoff, A.; Michaelis, A.; Schmiedel, C.; Uhlmann, E.; Blug, B.; Amann, T. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results. **Wear**, v. 342-343, p. 44–51, 2015. ISSN 0043-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.013>.

Canevarolo, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004. P. 448.

Dixit, N.; Sharma, V.; Kumar, P. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 64, p. 1434–1461, 2021. ISSN 1526-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.009>.

Gorana, V. K.; Jain, V. K.; Lal, G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. **Wear**, v. 260, n. 1, p. 128–139, 2006. ISSN 0043-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038>.

Goyal, A.; Singh, H.; Goyal, R.; Singh, R.; Singh, S. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 3065–3072, 2022. 3rd International Conference on Contemporary Advances in Mechanical Engineering. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>.

Kumar, S.; Singh, K.; Brar, B. S.; Kumar, R. Effect of processing condition on abrasive flow machining process: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2023. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.237>.

Machado, A. M. L.; Noberto, C. C.; Damasceno Filho, F. E.; Silva, W. M. M. d.; Babadopulos, L. F. d. A. L.; Medeiros Júnior, M. S. Estudo comparativo entre os parâmetros reológicos de tintas acrílicas arquitetônicas. **Ambiente Construído**, Associação Nacional de

Tecnologia do Ambiente Construído - ANTAC, v. 22, n. 1, p. 223–240, out. 2022. ISSN 1678-8621. DOI: 10.1590/s1678-86212022000100589.

Marliere, C. Study of hydric transfers in porous media with water retaining polymers : application to mortar, out. 2013.

Mezger, T. G. **The Rheology Handbook**: For users of rotational and oscillatory rheometers. 2nd. Hannover: Vincentz Network, 2006. P. 299. ISBN 3-87870-174-8.

Rajesha, S.; VENKATESH, G.; SHARMA, A. K.; KUMAR, P. Performance study of a natural polymer based media for abrasive flow machining. **Indian Journal Of Engineering & Materials Sciences**, p. 407–413, 2010. ISSN 0975-1017.

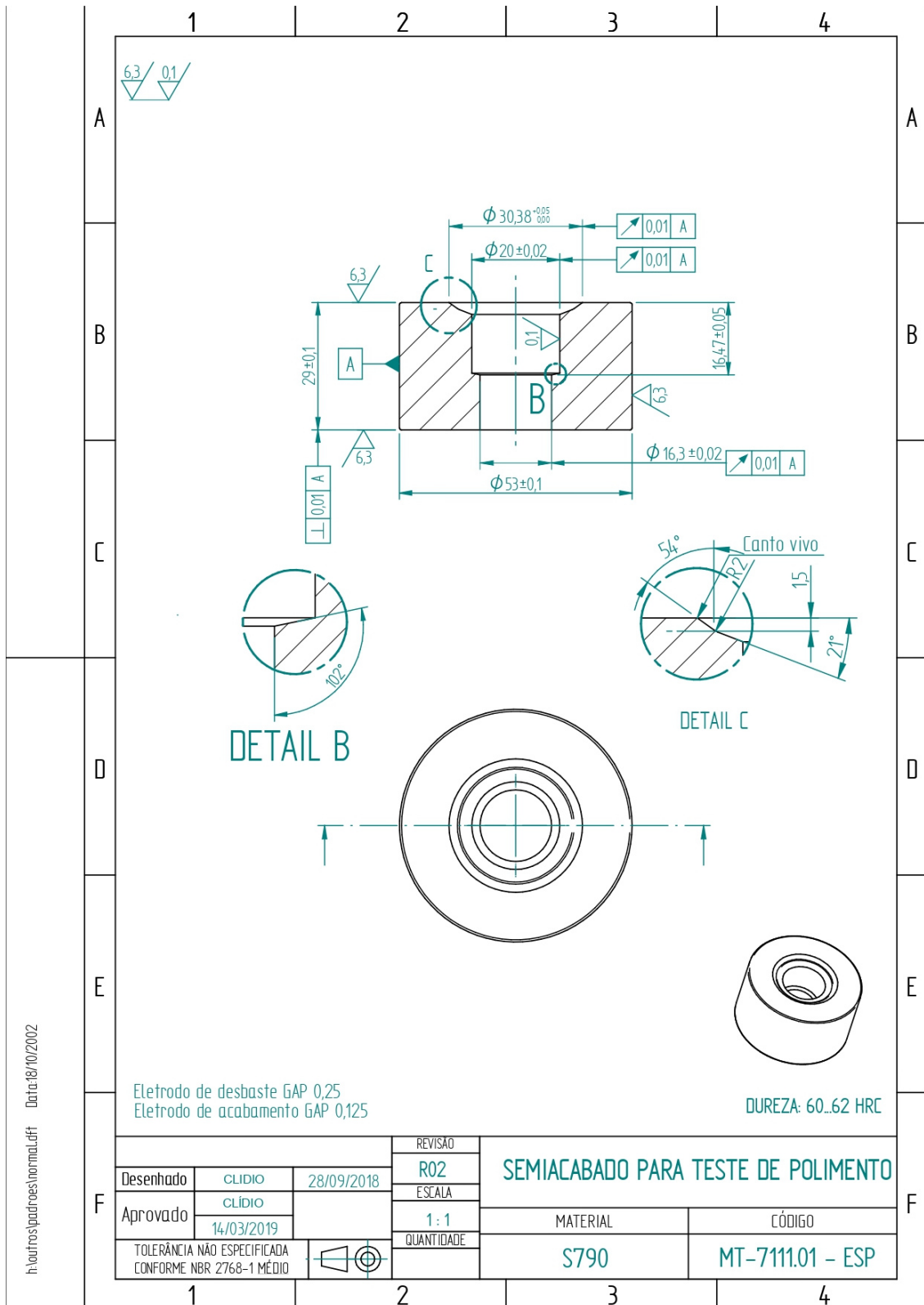
Ravi Sankar, M.; Jain, V. K.; Ramkumar, J.; Joshi, Y. M. Rheological characterization of styrene-butadiene based medium and its finishing performance using rotational abrasive flow finishing process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 12, p. 947–957, 2011. ISSN 0890-6955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.012>.

Schramm, G. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. 2nd. Alemanha: Gebrueder Haake, 1994. P. 290.

Singh, S.; Kumar, H.; Kumar, S.; Chaitanya, S. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 3108–3116, 2022. 3rd International Conference on Contemporary Advances in Mechanical Engineering. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.273>.

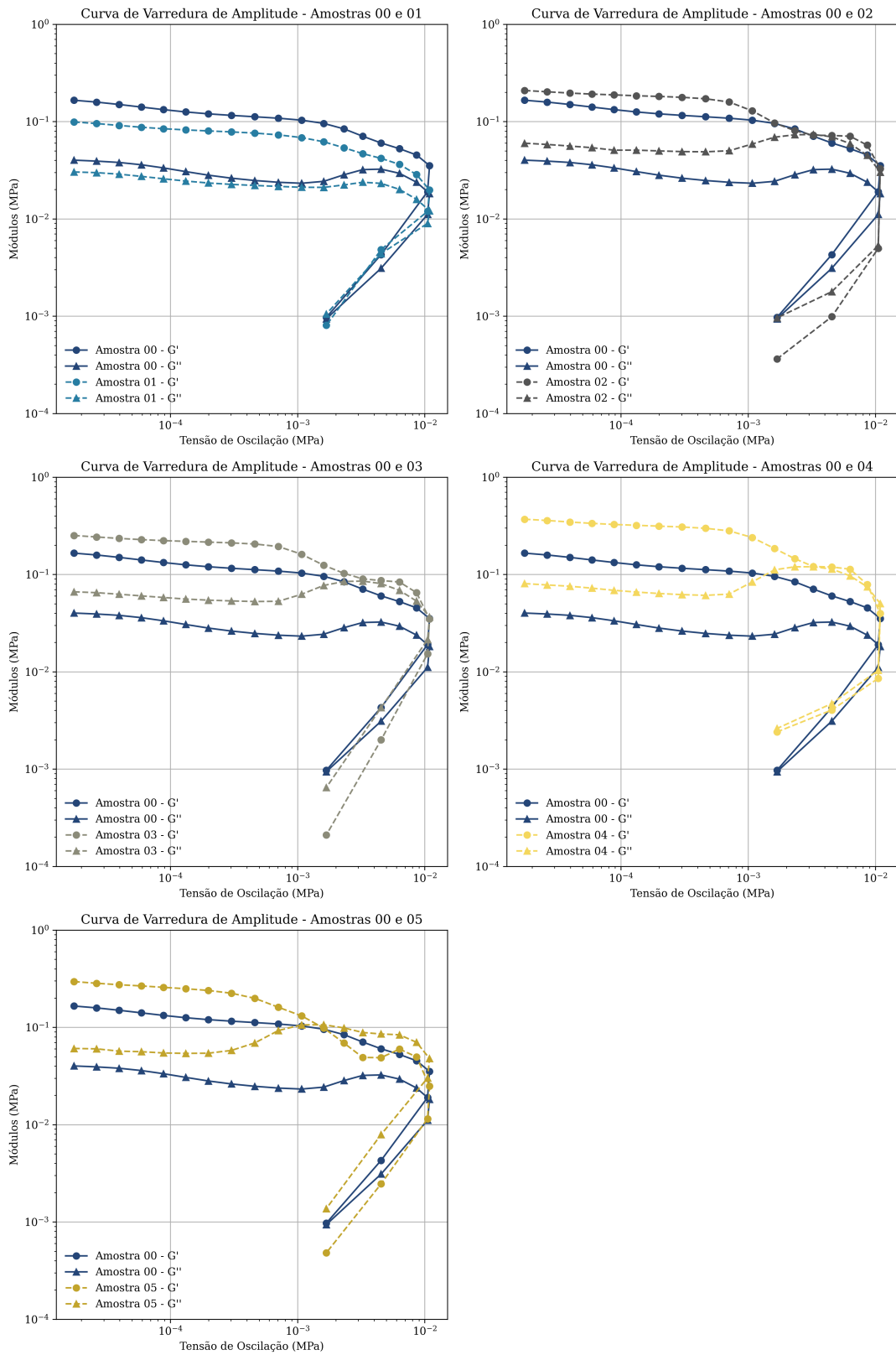
Souza Gonçalves, J. F. de; Neves, A. C.; Severino, J. V.; Romano, L. M. F. Explorando alternativas eco-amigáveis: óleos de babaçu e moringa como elementos viscoelásticos em usinagem por fluxo abrasivo para melhoria da qualidade superficial de ligas metálicas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 1–11, 2023. ISSN 2176-7270. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/22444>. Acesso em: 29 abr. 2024.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO CORPO DE PROVA

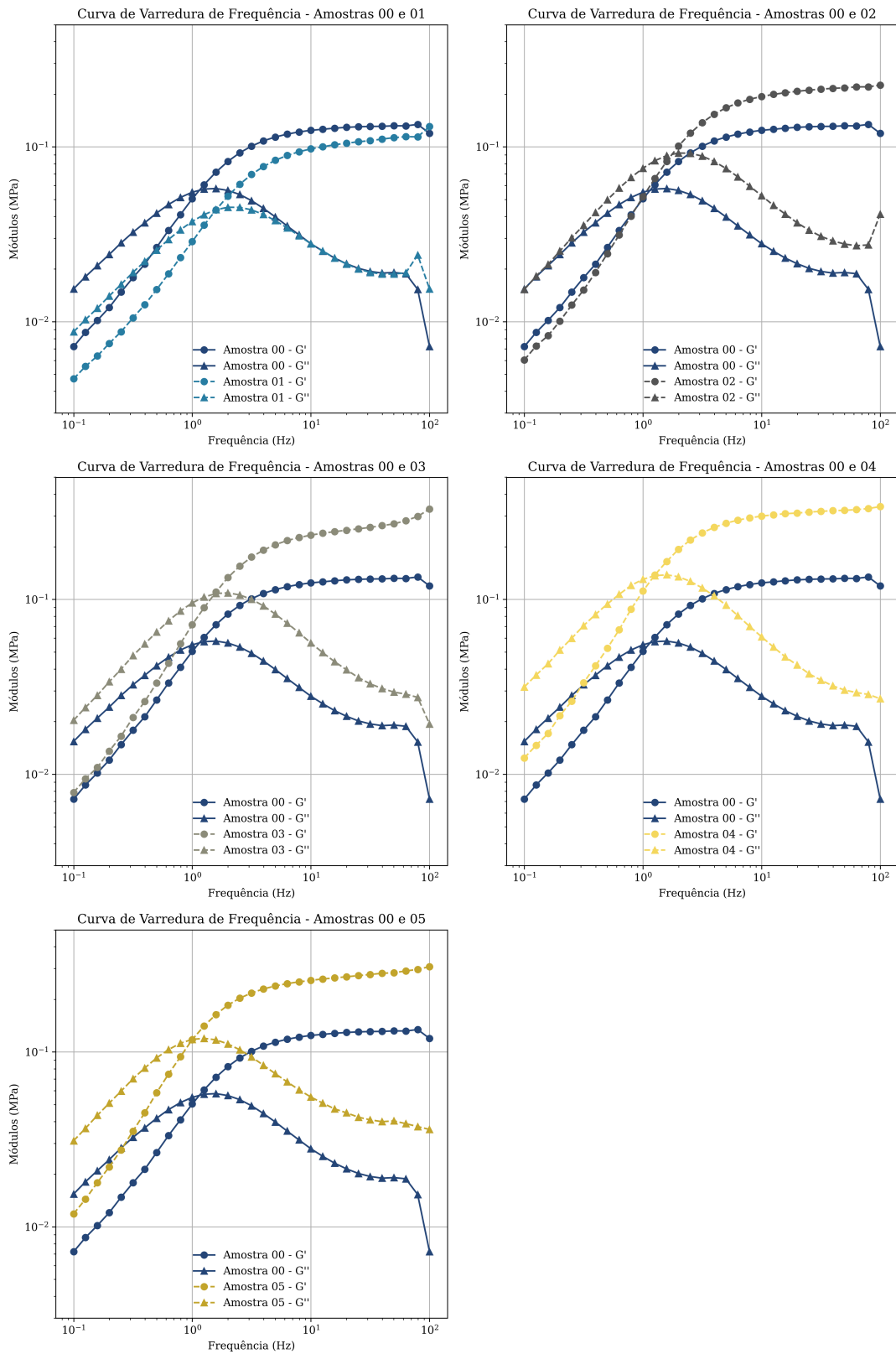


h:\outros\padroes\normal.dwg Data:18/10/2002

APÊNDICE B – VARREDURA DE AMPLITUDE



APÊNDICE C – VARREDURA DE FREQUÊNCIA



APÊNDICE D – RAMPA DE FLUXO UP & DOWN