

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUSTAVO AMARAL CORACINI**

**USINAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS AVANÇADOS  
PRÉ-SINTERIZADOS POR DIFERENTES TEMPERATURAS**

**GUARAPUAVA**

**2025**

versão 11.0 (abr.25)

**GUSTAVO AMARAL CORACINI**

**USINAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS AVANÇADOS  
PRÉ-SINTERIZADOS POR DIFERENTES TEMPERATURAS**

**Machining and characterization of advanced ceramic materials pre-sintered at  
different temperatures**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecânica, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientador: Marcos Gonçalves Júnior.

**GUARAPUAVA**


**2025**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## Usinagem e caracterização de materiais cerâmicos avançados pré-sinterizados por diferentes temperaturas

### Machining and characterization of advanced ceramic materials pre-sintered at different temperatures

Gustavo Amaral Coracini<sup>1</sup> , Marcos Júnior Gonçalves<sup>1</sup> , Gabriel Angelo Dal Posso<sup>1</sup>,  
Adriana e Silva da Costa , Christiane Lago Ojaimi<sup>2</sup> , Adriana Scoton Antônio Chinelatto<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Guarapuava, PR, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Engenharia e Ciências dos Materiais. Ponta Grossa, PR, Brasil.

e-mail: gustavocoracini@gmail.com, mgjunior@utfpr.edu.br, gabrielpanisson10@gmail.com, adsilva@utfpr.edu.br, christianelago@yahoo.com.br, adriana@uepg.br

#### RESUMO

A usinagem de cerâmica avançada pré-sinterizada é uma técnica empregada para melhorar a resistência do compacto, facilitando a usinabilidade em comparação com a cerâmica em verde (frágil) e a cerâmica sinterizada (extremamente dura). Diversos fatores influenciam esse processo, incluindo a temperatura de pré-sinterização, os parâmetros de usinagem, o método de compactação e o tipo de material cerâmico. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes temperaturas de pré-sinterização no processo de torneamento de cerâmicas avançadas, buscando identificar a condição ideal para otimizar a fabricação de componentes cerâmicos. Para tanto, foi utilizada uma bancada de usinagem equipada com sistema de monitoramento da força de avanço por meio de célula de carga. Foram analisadas as propriedades de densidade, retração linear, força de avanço, dureza e acabamento superficial (pré-sinterizado e sinterizado) em quatro temperaturas: 950°C, 1000°C, 1050°C e 1100°C. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura de pré-sinterização resultou em maior dureza e maior força de avanço. Em relação ao acabamento superficial, observou-se maior rugosidade para temperaturas superiores a 1000°C. As análises indicam que a temperatura de 950°C é a mais adequada para a pré-sinterização da cerâmica de alumina, pois a usinagem nessa temperatura apresentou a menor dureza e força de avanço, reduzindo o desgaste da ferramenta de corte e, conseqüentemente, os custos de fabricação. Além disso, não se observou uma diferença significativa no tamanho de grão entre as amostras pré-sinterizadas em diferentes temperaturas.

**Palavras-chave:** Cerâmica avançada; Pré-sinterização; Acabamento superficial; Forças de usinagem; Otimização de parâmetros.

#### ABSTRACT

The machining of pre-sintered advanced ceramics is a technique used to enhance the strength of the compact, facilitating machinability compared to green ceramics (brittle) and fully sintered ceramics (extremely hard). Several factors influence this process, including pre-sintering temperature, machining parameters, compaction method, and ceramic material type. This study aims to evaluate the influence of different pre-sintering temperatures on the turning process of advanced ceramics, seeking to identify the optimal condition for optimizing the manufacturing of ceramic components. A machining setup equipped with a feed force monitoring system using a load cell was employed. The analyzed properties included density, linear shrinkage, feed force, hardness, and surface finish (both pre-sintered and sintered) at four pre-sintering temperatures: 950°C, 1000°C, 1050°C, and 1100°C. The results indicated that increasing the pre-sintering temperature led to higher hardness and greater feed force. Regarding surface finish, higher roughness was observed at temperatures above 1000°C. The analysis suggests that a pre-sintering temperature of 950°C is the most suitable for alumina ceramics, as machining at this temperature resulted in the lowest hardness and feed force, reducing cutting tool wear and, consequently, manufacturing costs. Furthermore, no significant difference in grain size was observed among the samples pre-sintered at different temperatures.

**Keywords:** Advanced Ceramics; Pre-Sintering; Surface Finish; Machining Forces; Parameter Optimization.

## 1. INTRODUÇÃO

As cerâmicas avançadas desempenham um papel fundamental em várias indústrias, são amplamente utilizadas em diversas aplicações tecnológicas devido às suas excelentes propriedades mecânicas, térmicas e químicas, como alta dureza, resistência ao desgaste e estabilidade em altas temperaturas. Esses atributos tornam esse material essencial em componentes para a indústria aeroespacial, biomédica e eletrônica [1-3]. Uma das cerâmicas avançadas mais estudadas e amplamente utilizadas como cerâmica estrutural é a alumina ( $Al_2O_3$ ), devido à sua elevada dureza, alta resistência ao desgaste, estabilidade química, baixa densidade, alta temperatura de fusão, alta resistividade elétrica e baixo custo [4]. No entanto, as cerâmicas avançadas ainda não são tão populares no mercado como deveriam ser. Alguns pontos podem ser considerados para explicar esta afirmação, como ainda seu custo elevado de produção, familiaridade inicial da comunidade de engenharia, ainda predominantemente focada em materiais metálicos, e a limitada tenacidade das cerâmicas, ou seja, baixa capacidade de absorver energia [5]. Outro ponto importante é que uma substituição direta de componentes em metal para cerâmica nem sempre é possível, devido às concentrações de tensões presentes [6].

A usinagem é um processo de manufatura que transforma a matéria-prima por meio da remoção de material, resultando na formação de cavacos. Dessa forma, qualquer técnica que envolva a retirada de material, seja por cisalhamento ou pela geração de cavacos, pode ser classificada como um processo de usinagem [7]. A usinagem de cerâmicas avançadas pode ocorrer em três estágios diferentes: usinagem no estado em verde, logo após a prensagem, usinagem após a pré-sinterização, e por último, a usinagem pós sinterização, cada um com suas características e especificações [8, 9]. Devido ao aumento da dureza na cerâmica com o incremento da temperatura, necessita-se de ferramentas mais duras para evitar o desgaste excessivo das ferramentas de corte [10]. A demanda de ferramentas de diamante, principal técnica conhecida, torna o processo de usinagem de cerâmicas sinterizadas muito cara, podendo chegar a 50% de todo o custo de produção da peça [11, 12].

Uma opção é realizar a usinagem da cerâmica em seu estado pré-sinterizado, pois há um aumento da resistência mecânica sem que as propriedades finais sejam atingidas, o que diminui trincas e lascamentos durante a usinagem. No entanto, é necessário o uso de ferramentas mais duras do que as utilizadas na usinagem a verde, o que deve ser considerado no custo final do processo [13]. A usinagem na forma pré-sinterizada também contribui para a redução de custos e minimiza distorções na forma final da peça após a sinterização completa. No trabalho realizado por GONÇALVES *et al.* [14] foi avaliado o acabamento de cerâmicas em verde e pré-sinterizadas (900°C), utilizando o método de torneamento assistido por ultrassom (UAT). Os resultados mostraram uma redução significativa na probabilidade de danos críticos na superfície do material em comparação com o torneamento convencional (CT), além de uma diminuição expressiva no arrancamento de aglomerados em peças pré-sinterizadas em relação às peças no estado verde, resultando em uma melhor qualidade das peças usinadas.

No experimento conduzido por KAVASHIMA *et al.* [15], as amostras passaram por prensagem uniaxial, seguida de prensagem isostática a frio sob 200 MPa, e foram pré-sinterizadas em temperaturas variando de 900°C a 950°C. A pesquisa mostrou que uma variação de 50°C na temperatura de pré-sinterização, acima de 900°C, influenciou significativamente a microdureza. Além disso, a temperatura mais alta de pré-sinterização resultou em um desempenho superior durante a usinagem.

A usinagem em cerâmicas pré-sinterizadas é bastante utilizada na confecção de implantes odontológicos, tais como pontes e coroas, onde blocos de cerâmicas avançadas sofrem uma queima parcial, facilitando a usinagem e modelagem dos implantes, e, posteriormente feita a sinterização completa para se obter as propriedades finais desejadas [16, 17].

O estudo das forças de usinagem é essencial no planejamento do processo, pois auxilia na seleção das condições de corte mais adequadas. Além disso, contribui para reduzir o desgaste das ferramentas de corte e minimizar a probabilidade de sua quebra. Vale destacar que forças de corte elevadas podem afetar significativamente a qualidade final da peça usinada [18]. Portanto, compreender e controlar essas forças é fundamental para garantir a precisão e a integridade das peças fabricadas. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos da temperatura de pré-sinterização da cerâmica no processo de torneamento, correlacionando seu comportamento durante a usinagem e avaliando parâmetros como: força de avanço, acabamento superficial, dureza, retração linear e densidade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve todos os materiais, procedimentos e métodos usados na parte experimental do trabalho do processo de usinagem em cerâmicas pré-sinterizadas em diferentes temperaturas.

## 2.1. Corpo de prova

Os corpos de prova são compostos de uma mistura de pós cerâmicos de Alumina Calcificada A1000-SG, ou seja, submetida a uma alta temperatura. A mistura leva quatro elementos em sua composição, 30% de alumina em pó espalhada em 68% de água destilada e deionizada, junto a adição de 1% de PVA1 (álcool polivinílico), usado como ligante, e 1% de poliacrilato de amônia, utilizado como defloculante. A compactação da cerâmica dos corpos de prova ocorreu pelo método de prensagem uniaxial de simples ação, em seguida por prensagem isostática. Na prensagem uniaxial de simples ação, utilizou-se uma pressão de compactação de 120 MPa. Já na prensagem isostática foi estabelecido uma pressão de 200 MPa. Os corpos de prova têm formato cilíndrico com dimensão de aproximadamente  $\varnothing$  15,0 mm x 20,0 mm compactados de forma uniaxial.

Para a pré-sinterização dos corpos de prova foi utilizado um forno de sinterização de cerâmicas, modelo EDG F-1800 da fabricante EDG Equipamentos. As temperaturas estabelecidas foram de 950°C, 1000°C, 1050°C e 1100°C. Temperaturas acima de 1100°C não foram utilizadas devido a um aumento elevado da dureza, o que prejudicaria a usinagem. Para cada temperatura foram elaborados três corpos de prova, sendo dois usados para a usinagem e outro para avaliação de dureza e demais parâmetros (densidade e retração).

O processo de pré-sinterização para a temperatura de 950°C ocorreu conforme o gráfico da Figura 1, iniciou-se a temperatura ambiente (em torno de 25°C), com uma rampa de 3°C/min até os 300°C e permaneceu em um patamar de 5 minutos, totalizando 97 minutos. Dos 300°C passou aos 600°C com uma rampa de 4°C/min com patamar de 10 minutos, totalizando 85 minutos. Por fim, dos 600°C até os 950°C com rampa de 5°C/min e um patamar de 120 minutos, totalizando 190 minutos. O tempo total de queima foi de 372 minutos. Os corpos de prova foram resfriados com uma rampa de resfriamento de 20°C por minuto até os 200°C. Para as demais temperaturas os tempos e patamares foram os mesmos, mudando apenas a temperatura final, 1000°C, 1050°C e 1100°C respectivamente.

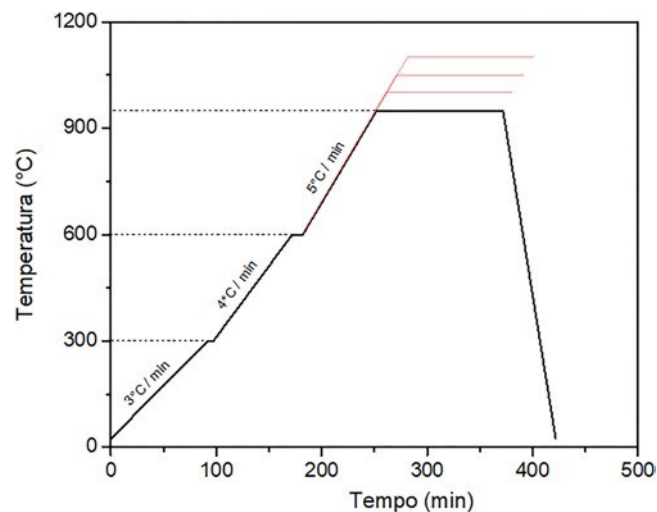


Figura 1: Gráfico da rampa de pré-sinterização.

## 2.2. Retração linear e densidade

A primeira análise realizada foi a retração linear, obtida a partir das dimensões do diâmetro dos corpos de prova antes e após a pré-sinterização. As medidas foram feitas com um micrômetro de alta precisão, especificamente o micrômetro externo Mitutoyo série 103-129, que possui uma resolução de 0,001 mm. Todas as medições foram efetuadas na região central das amostras, escolha fundamentada na intenção de minimizar o risco de danos nas bordas, uma vez que, nesse estado, qualquer pressão aplicada nessa região poderia causar trincas que comprometeriam as análises subsequentes.

Posteriormente, foi realizado o cálculo da densidade, seguindo o princípio de Arquimedes, que utiliza medidas das peças secas, úmidas e imersas em água destilada, como especificado na norma ASTM C373-18R23 [19]. Este experimento nos permite determinar a densidade teórica das amostras. Para a determinação da densidade, foram utilizados uma balança de precisão Bel Engineering modelo MG214Ai e um kit de medição de densidade da mesma fabricante. Inicialmente, as amostras foram submersas em água destilada por 24 horas; em seguida, o peso de cada uma foi medido na balança de precisão, tanto o peso imerso quanto o úmido. Após essa etapa, as amostras foram colocadas em uma estufa a 110°C por 24 horas para secagem, a fim de obter o peso seco.

Para avaliar a dureza dos corpos de prova pré-sinterizados, foi realizado o teste de dureza utilizando um microdurômetro Vickers, da marca Shimadzu e modelo HMV-2T, com carga de 9,81 N (1kgf) e com tempo de 10 segundos, seguindo toda a metodologia proposta pela norma ASTM C1327-15 [20].

### 2.3. Processo de usinagem

A usinagem dos corpos de prova cerâmicos foi realizada por meio da operação de torneamento em um centro de usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado), modelo CNC D 600, da fabricante ROMI. O equipamento está localizado no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Guarapuava (UTFPR-GP).

A ferramenta de corte selecionada foi o inserto de super micro-grãos de diamante policristalino (PCD) modelo TPGB 110302SE KPD001, da fabricante Kyocera. Este inserto foi escolhido por suas propriedades de elevada dureza e resistência ao desgaste. A escolha dessa ferramenta levou em consideração a necessidade de evitar o desgaste significativo durante os ensaios, garantindo que os resultados não fossem influenciados por variações no estado da ferramenta de corte.

Este estudo foi fundamentado nos parâmetros apresentados no trabalho de GONÇALVES *et al.* [14], no qual identificou uma condição ideal de corte e analisou a precisão do torneamento de compactos cerâmicos, observando o comportamento da rugosidade superficial com o objetivo de reduzir custos, minimizar danos e aumentar a resistência das peças. No entanto, como a seleção adequada dos parâmetros de usinagem, especialmente em cerâmicas, é um processo empírico (devido às diferenças na configuração dos equipamentos de usinagem), foram realizados testes preliminares para definir a condição ideal neste trabalho, sendo os parâmetros que proporcionam o melhor acabamento no processo de torneamento foram: velocidade de corte ( $V_c$ ) = 54 m/min, velocidade de avanço ( $V_f$ ) = 13 mm/min e profundidade de corte ( $a_p$ ) = 1,0 mm. Para padronizar a velocidade de corte em todos os ensaios, foi levado em consideração o diâmetro de cada amostra, selecionando assim a rotação em cada ensaio.

A medição das forças de usinagem é fundamental para a análise do comportamento mecânico do material e para a otimização do processo de torneamento, foi mensurada a força de avanço ( $F_p$ ), sendo a variável de maior influência significativa, apresentando maiores valores do que a força de corte ( $F_c$ ) e a força de profundidade ( $F_r$ ) [21]. Além disso, no estudo de MAIER e MICHAELI [22], os autores verificaram de modo geral que o aumento do avanço produziu incremento significativo da rugosidade e nas forças geradas. Neste trabalho, utilizou-se uma bancada de ensaio desenvolvida por CORACINI e GONÇALVES JUNIOR [23], projetada para mensurar as forças atuantes durante a usinagem. A bancada conta com uma célula de carga integrada e um sistema de aquisição de dados baseado em um microcontrolador Arduino, permitindo a captura e registro das forças exercidas sobre a ferramenta de corte.

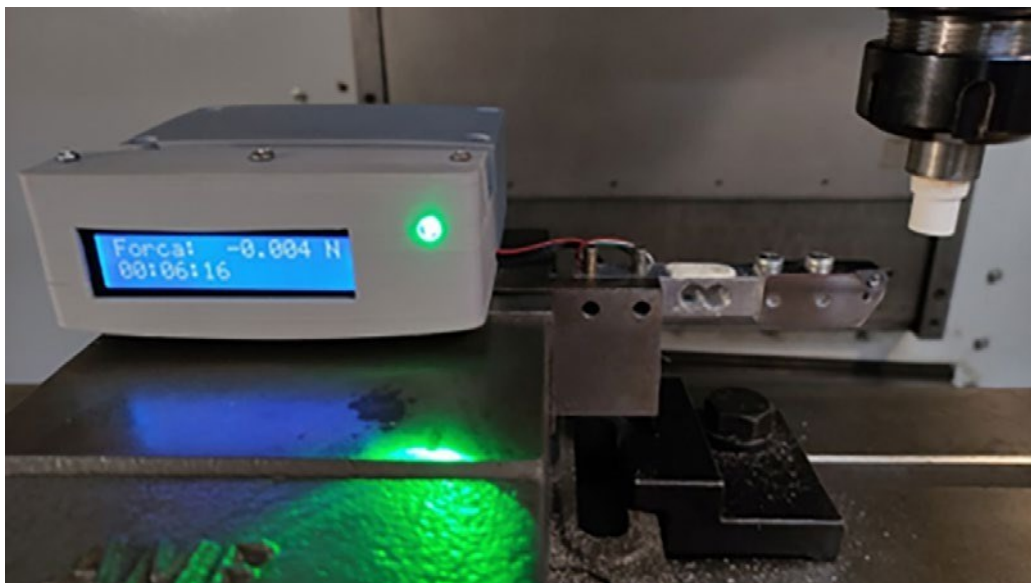
A bancada de ensaio é composta pelos seguintes elementos principais:

- Uma célula de carga com capacidade de medição de 20 Kg, esta célula de carga converte a força mecânica aplicada na ferramenta em um sinal elétrico proporcional. O sensor é capaz de medir forças em uma única direção, podendo ser posicionado para captar a força de avanço ou a força de corte, conforme necessário;
- Módulo conversor HX711, responsável por amplificar e converter os sinais analógicos emitidos pela célula de carga em sinais digitais, garantindo maior precisão na aquisição dos dados;
- Um microcontrolador Arduino UNO, atua como unidade de processamento do sistema, realizando a leitura dos dados provenientes do módulo HX711 e registrando as informações em um cartão de memória para posterior análise e geração de gráficos;
- Display LCD 16x2 que permite a visualização em tempo real das forças medidas, facilitando o monitoramento durante os ensaios.
- Uma bateria de lítio 18650 e um módulo regulador de tensão garantem a alimentação do sistema, permitindo a operação autônoma da bancada de ensaio.
- Um LED RGB fornece um indicativo visual das condições de força, podendo alertar o operador sobre valores críticos configurados previamente no código do Arduino.
- A fixação da célula de carga na bancada possibilita sua rotação para ajuste na direção da força a ser medida (força de corte ou força de avanço), garantindo flexibilidade nos ensaios. Além disso, o equipamento conta com um case impresso em 3D, que abriga e protege os componentes eletrônicos contra impactos e partículas geradas no processo de usinagem.

Para garantir a confiabilidade dos dados obtidos, a bancada de ensaio foi submetida a um processo de calibração. A calibração foi realizada posicionando pesos de massa conhecida sobre a ferramenta de corte, ajustando o fator de escala no código do microcontrolador para que os valores exibidos correspondessem às forças aplicadas. Após a calibração inicial, testes de validação foram conduzidos com diferentes pesos, confirmando uma resolução de 0,001 N, desvio padrão de 0,00137 N, um erro máximo registrado de 0,010 N, uma faixa de medição de 0 a 50 N e taxa de aquisição de uma medição por segundo.

A metodologia de calibração adotada assegura que a bancada seja capaz de fornecer dados consistentes e repetitivos, indicando que o equipamento de medição de forças de usinagem fornece uma boa aproximação da média da força medida, permitindo a análise das forças atuantes durante o torneamento de cerâmicas avançadas.

Um trabalho semelhante sobre a usinagem de cerâmica avançada, que utilizou o método de controle das forças de usinagem por meio de uma célula de carga, foi realizado por SANCHEZ *et al.* [11], que avaliaram o acabamento de cerâmica no estado em verde pelo processo de torneamento. A Figura 2 apresenta a montagem dos equipamentos na máquina para o ensaio de usinagem de cerâmica.



**Figura 2:** Montagem de todos os equipamentos na máquina para o ensaio.

#### 2.4. Acabamento superficial

Para a avaliação dos corpos de prova após a usinagem, foi analisado o acabamento superficial. Para isso, utilizou-se um perfilômetro óptico da empresa britânica Taylor Hobson CCI Lite. Ao submeter a peça cerâmica à análise do perfilômetro, um feixe de luz incide sobre a superfície do material, retornando, em escala nanométrica, a rugosidade superficial deste. Além dessa análise, imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), obtidas por um equipamento da marca Tescan, modelo VEGA3, pertencente ao C2MMA da UTFPR do Campus de Ponta Grossa, foram utilizadas para avaliar o acabamento superficial da peça após a sinterização.

Vale ressaltar que, para a análise da superfície após o processo de usinagem, não foram realizados procedimentos de acabamento, como lixamento, polimento ou ataque térmico, pois esses procedimentos poderiam alterar as características superficiais geradas pela usinagem, comprometendo a avaliação precisa dos efeitos do processo sobre a superfície original das amostras.

### 3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados do trabalho, apresentando dados, tabelas e gráficos comparativos entre as diferentes temperaturas utilizadas.

#### 3.1. Retração linear

A Figura 3 apresenta a retração linear em cada uma das quatro temperaturas, evidenciando o comportamento das amostras individuais e confirmando a tendência de maior retração à medida que a temperatura aumenta.



Figura 3: Retração linear das amostras.

Na Figura 4 pode-se observar individualmente o comportamento da retração nas amostras. A temperaturas menores que 1100°C a alumina teve retração inferior a 1%. Podemos comparar com o trabalho de LI *et al.* [13], em que obteve retração na casa de 0,1% para temperaturas até 850°C, subindo até 0,47% a 1000°C. Assim como HONDO *et al.* [24] analisou que a retração da alumina começa a aumentar de forma mais intensa a partir dos 1200°C, indo de cerca de 2% para perto dos 16% a 1500°C. A Figura 4 mostra a diferença dos diâmetros das amostras em verde e pré-sinterizadas.

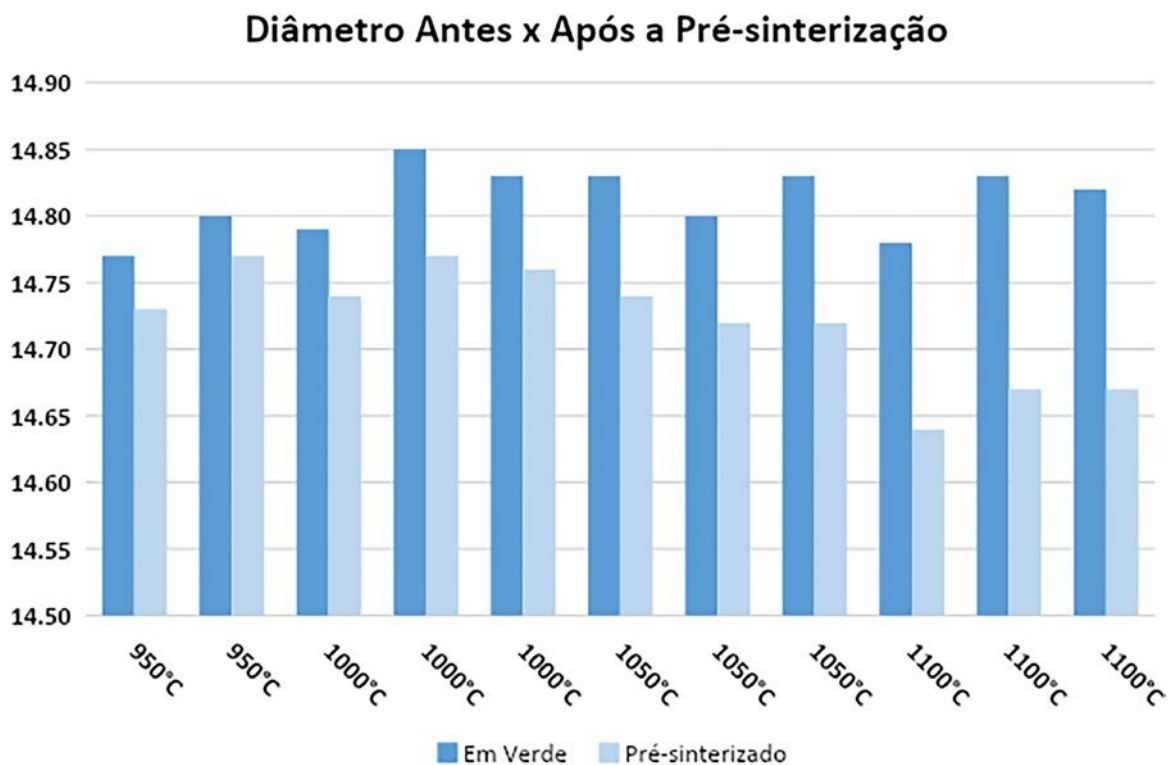


Figura 4: Diâmetros em verde e pré-sinterizado.

Uma vez apresentado os gráficos comparativos, conseguimos constatar alguns pontos importantes, a retração ocorreu de forma linear com o aumento da temperatura, seguindo os moldes do que fala a literatura. Além do mais, a retração foi abaixo de 1% para temperatura até 1050°C, mesmos valores encontrados por outros autores.

### 3.2. Densidade teórica

A densidade teórica das amostras encontra-se na Figura 5.



Figura 5: Densidade teórica das amostras.

É observado a tendência de uma maior densificação com o aumento da temperatura após os cálculos de Arquimedes. A variação entre as temperaturas de 950°C e 1100°C chegou a 2%, valores muito próximos as da retração linear nas amostras. É possível relacionar que a maior densificação do compacto propicia um aumento da resistência mecânica em relação as amostras a verde, o que facilita o manuseio e a usinagem das peças. Essa maior resistência permite que as amostras suportem melhor as tensões aplicadas durante o processo, reduzindo a chance de danos ou fraturas.

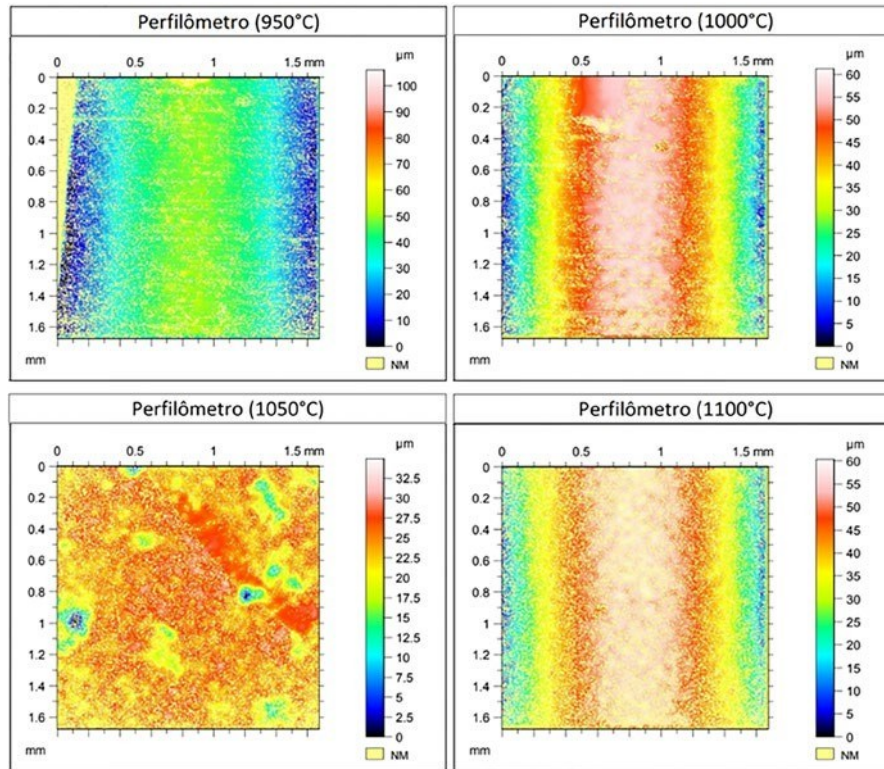
### 3.3. Acabamento superficial pré-sinterizado

O acabamento superficial de amostras de alumina pré-sinterizadas em diferentes temperaturas (950°C, 1000°C, 1050°C e 1100°C) é analisado detalhadamente. Os parâmetros de rugosidade Ra (rugosidade média) e Rz (altura máxima do perfil) foram medidos e comparados para determinar o efeito das mudanças de temperatura na qualidade da superfície das amostras. A Tabela 1, lista os valores de rugosidade das amostras sinterizadas em diferentes temperaturas, onde estão resumidos os resultados médios obtidos para Ra e Rz.

Tabela 1: Valores de Ra e Rz de acordo com a temperatura de pré sinterização.

TEMPERTURA (°C)	RA (μM)	RZ (μM)
950	5,88	106
1000	5,09	108
1050	5,84	103
1100	6,82	102

No estado verde, a superfície pode se tornar mais homogênea devido à presença do plastificante, o que a deixa mais uniforme após a usinagem. Após a sinterização, como o plastificante não está mais presente e ocorre a ligação das partículas, formando ‘pescoços’ e contornos de grãos, o compacto pode apresentar maiores valores de rugosidade superficial em comparação ao estado verde. No estado pré-sinterizado, há uma tendência de aumento da rugosidade à medida que a temperatura aumenta, sendo perceptível uma diferença significativa acima de 1050°C, conforme mostrado na Tabela 1. A Figura 6 exibe imagens geradas pelo perfilômetro para cada uma das peças pré-sinterizadas.



**Figura 6:** Superfície das amostras pré-sinterizadas.

Os resultados mostram que a temperatura de sinterização tem um efeito significativo no acabamento superficial da alumina. A partir de 1050°C, o crescimento dos grãos, que são transformações microestruturais importantes no processo de pré-sinterização da cerâmica de alumina, afetam diretamente as propriedades mecânicas e a densificação do material final, e passam a desempenhar um papel dominante na formação da superfície, criando irregularidades que se refletem no valor de Ra. Esse comportamento pode ser observado na Tabela 2, onde os valores de Ra e Rz não seguem uma tendência linear, mas apresentam complexidades que devem ser analisadas em conjunto com a microestrutura da amostra.

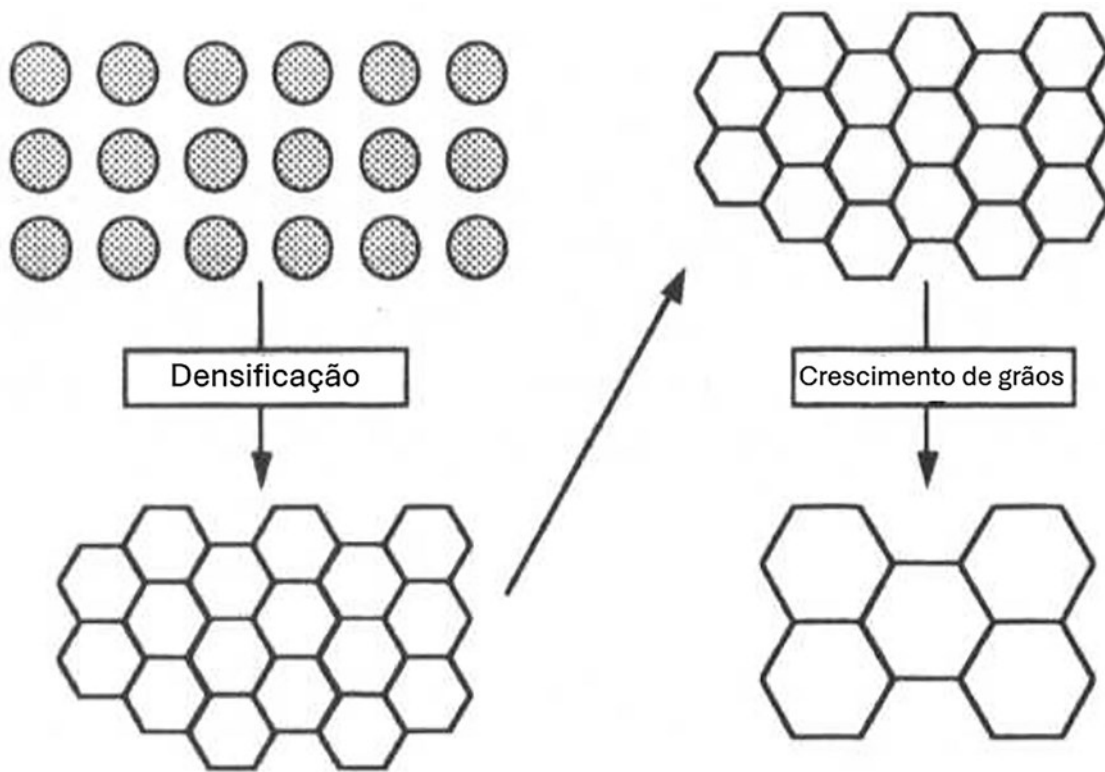
As partículas que formam um corpo cerâmico compactado apresentam um excedente de energia livre, que tende a diminuir durante o processo de sinterização. Essa diminuição na energia livre do sistema é conhecida como força motriz. No contexto da sinterização, a força motriz está associada à redução da área superficial (ou energia de superfície), que ocorre quando o pó cerâmico solto, caracterizado por uma alta energia superficial, é transformado em um corpo cerâmico consolidado, no qual os contornos de grãos possuem uma energia mais baixa [25].

**Tabela 2:** Dureza Vickers alumina.

TEMPERATURA (°C)	MEDIDA 1 (HV)	MEDIDA 2 (HV)	MEDIDA 3 (HV)	MEDIDA 4 (HV)	MEDIDA 5 (HV)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
950	46,3	48,9	52,3	49,9	53,2	50,1	2,8
1000	95,5	96,4	102,2	98,8	100,1	98,6	2,7
1050	152,3	145,8	149,6	148,9	148,2	149,0	2,4
1100	197,5	198,3	202,1	196,6	206,2	200,1	4

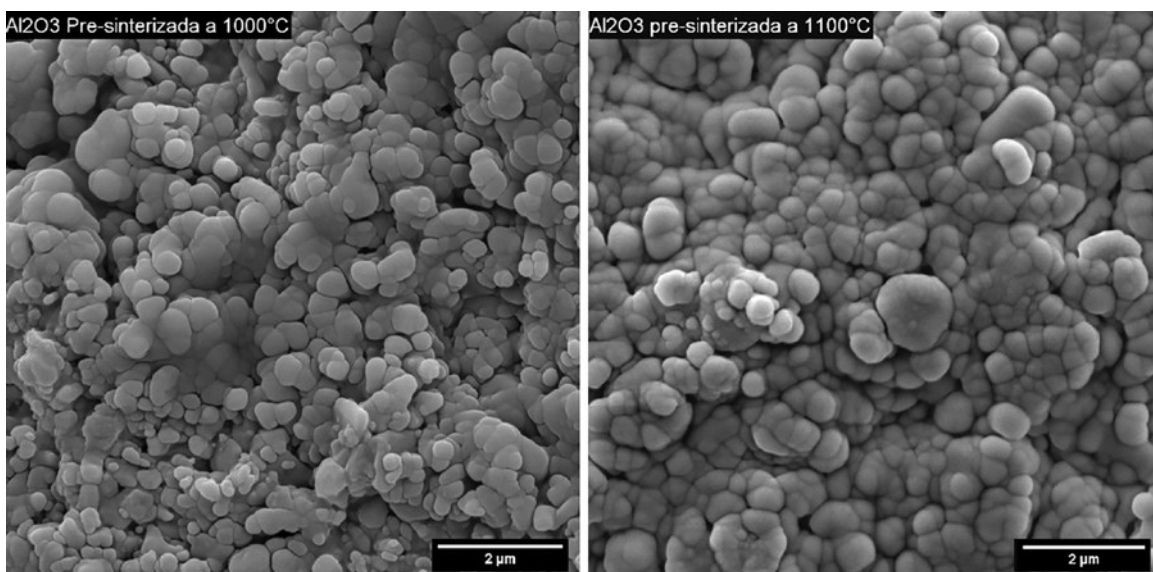
A Figura 7 ilustra a redução da energia livre excessiva presente no sistema durante a sinterização. Esse processo ocorre devido à diminuição do volume total de poros e ao conseqüente aumento da densidade do material, resultado do transporte de massa. Esse transporte acontece à medida que os átomos se deslocam das regiões de contato entre os grãos em direção aos poros, promovendo a densificação do corpo cerâmico. Além disso, quando a temperatura de sinterização atinge um determinado nível, a redução da energia livre pode ocorrer também pelo crescimento dos grãos [25]. Nesse estágio, há uma alteração na área superficial dos grãos, levando

ao seu arredondamento e aumento de tamanho. Esse crescimento acontece de maneira competitiva, onde os grãos maiores se expandem à custa dos menores, que acabam sendo absorvidos no processo. Isso contribui para a evolução da microestrutura do material, influenciando diretamente suas propriedades finais [26].



**Figura 7:** Representação esquemática do processo de densificação e crescimento de grãos. Adaptado de BARSOUM, 2003 [25].

As imagens do MEV apresentadas na Figura 8, que foram feitas com as amostras após o processo de pré-sinterização e antes de serem usinadas, é possível observar de forma mais clara os grãos, onde a 1100°C a densificação e a redução dos poros ficam bem mais evidentes e os grãos menores começando a ser consumidos pelos maiores, mostrando o início do crescimento dos grãos já começando a ocorrer na temperatura mais alta.



**Figura 8:** Imagens do MEV da superfície das amostras, após a pré-sinterização.

Estas observações são importantes para compreender como a temperatura de sinterização afeta o acabamento superficial e, portanto, a usinabilidade das peças. A seleção da temperatura ideal de sinterização não deve considerar apenas o grau de densificação necessário, mas também o efeito na rugosidade superficial, que afeta diretamente a qualidade final do produto.

### 3.4. Relação da dureza e força de avanço

A Tabela 2 mostra os valores de dureza Vickers para as amostras de alumina pré-sinterizadas nas quatro diferentes temperaturas de análise.

Para a temperatura de 950°C a dureza média foi de 50,1 HV, a baixa dureza pode ser atribuída à sinterização incompleta, resultando em alta porosidade e uma microestrutura menos harmônica. A maior difusão atômica a esta temperatura é insuficiente para promover uma densificação efetiva, o que resulta em uma menor resistência do material, e por consequência, menor dureza.

A 1000°C o significativo aumento na dureza, agora de 98,6 HV de média, indica uma densificação mais eficiente, com uma microestrutura menos porosa. A maior difusão atômica a esta temperatura, facilita a ligação entre os grãos, resultando em uma superfície mais resistente.

Ao chegar em 1050°C, a dureza continua aumentando devido à maior densificação dos grãos.

Por fim, na temperatura de 1100°C, é verificado a maior dureza alcançada, sugerindo uma maior densificação e uma microestrutura mais coesa. Porém, o maior desvio padrão indica uma variabilidade na dureza medida, o crescimento de grãos começa a ser um fator, possivelmente introduzindo algumas irregularidades na microestrutura que podem interferir na dureza de maneira sutil.

No ensaio de usinagem, para padronizar a velocidade de corte em 54 m/min, foi feita a Tabela 3 que considera o diâmetro de cada amostra a ser usinada e, com base na Equação 2, define o número de rotações por minuto em cada ensaio. Vale destacar que apenas um corpo de prova pré-sinterizado a 950°C foi selecionado para o ensaio de usinagem, sendo repetido o teste com o mesmo corpo de prova levando em consideração o novo diâmetro.

**Tabela 3:** Rotação selecionada por amostra.

Nº DO ENSAIO	TEMPERATURA DE PRÉ-SINTERIZAÇÃO (°C)	DIÂMETRO NA USINAGEM (mm)	ROTAÇÃO (rpm)
1	950	14,73	1167
2	950	12,73	1350
3	1000	14,74	1166
4	1000	14,77	1164
5	1050	14,74	1166
6	1050	14,72	1168
7	1100	14,64	1174
8	1100	14,67	1172

Nos processos de usinagem que envolvem movimentos de rotação, como torneamento, a velocidade de corte é determinada pela relação entre o diâmetro da peça e sua rotação. Essa velocidade é calculada utilizando a Equação 1, expressa nas unidades mais comuns em usinagem, garantindo um controle preciso do processo e a escolha adequada dos parâmetros operacionais [27].

$$Vc = (\pi * d * n) / 1000 \quad (1)$$

Onde:

$Vc$  = velocidade de corte

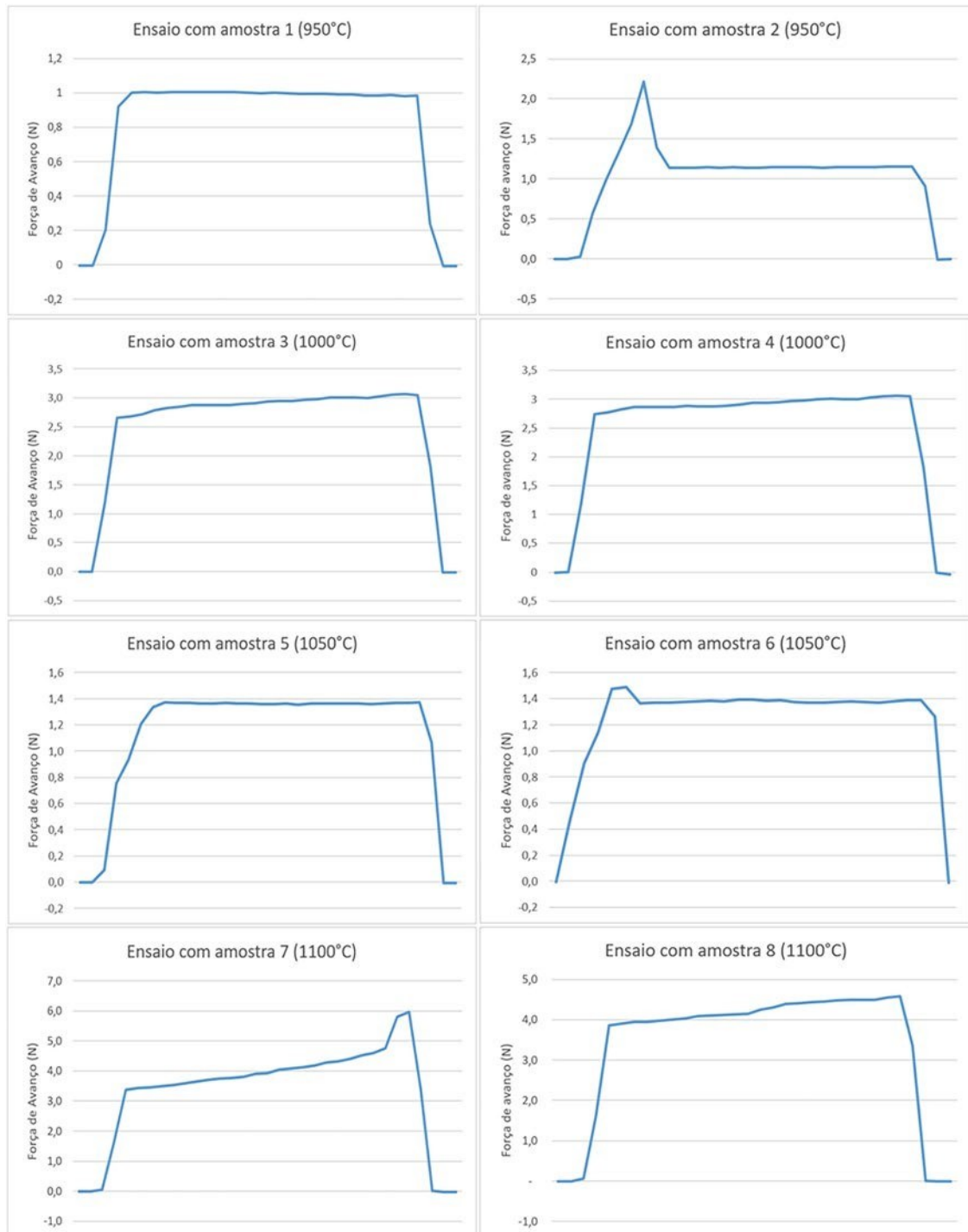
$d$  = diâmetro da peça em mm

$n$  = número de rotações por minuto (rpm)

Isolando o ( $n$ ) da Equação 1, pode-se calcular a rotação em função do diâmetro e velocidade de corte, conforme mostrado na Equação 2.

$$n = (Vc * 1000) / (\pi * d) \quad (2)$$

Os ensaios experimentais permitiram a obtenção dos valores da força de avanço ( $F_f$ ) durante o torneamento das amostras cerâmicas. A Figura 9 apresenta os gráficos da força de avanço para cada uma das oito amostras ensaiadas, evidenciando a variação dos valores ao longo do tempo de usinagem.



**Figura 9:** Gráficos da força de avanço em cada um dos ensaios.

Ao analisar os gráficos, nota-se que algumas amostras apresentaram oscilações mais acentuadas na força medida, possivelmente associadas a variações na microestrutura do material ou a pequenas imperfeições superficiais. Esse comportamento ressalta a importância da padronização das condições de usinagem para minimizar variações indesejadas e garantir maior reprodutibilidade do processo.

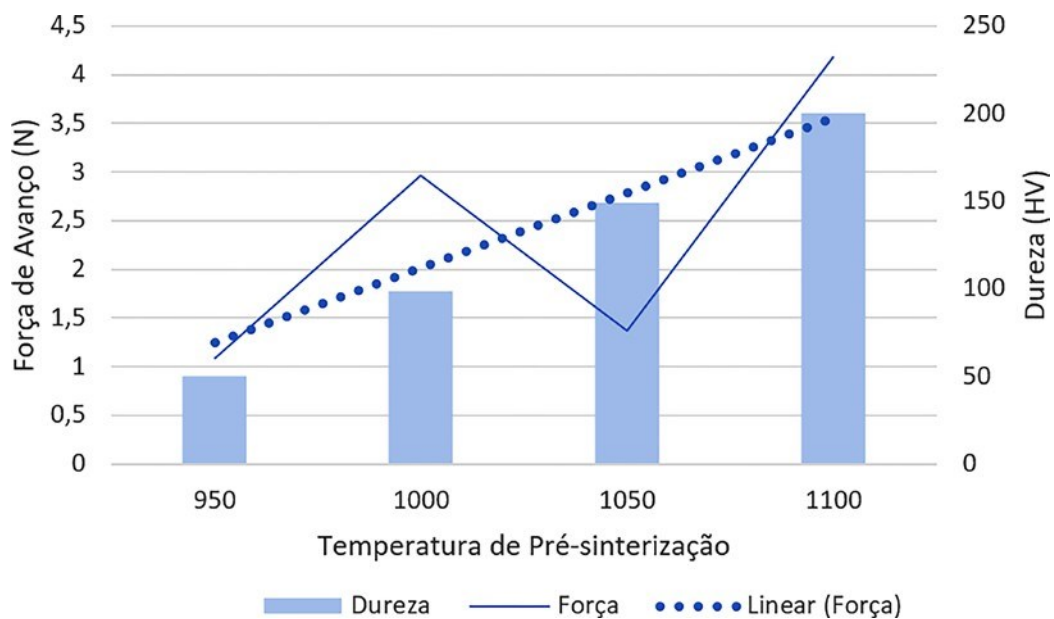
Foram calculados os valores médios e o desvio padrão dos resultados da força de usinagem para cada temperatura, apresentados na Tabela 4, destacando a variação conforme a condição de pré-sinterização da

alumina. Para isso, foi selecionado um intervalo de valores dentro de cada condição, descartando os valores das duas extremidades onde a aresta de corte não tinha contato total com a peça.

**Tabela 4:** Média e desvio padrão da força de avanço dos ensaios de usinagem.

Nº DO ENSAIO	TEMPERATURA DE PRÉ-SINTERIZAÇÃO (°C)	FORÇA DE AVANÇO MÉDIA (N)	DESVIO PADRÃO	MÉDIA COMBINADA (N)
1	950	0,996	0,0076	1,094
2	950	1,191	0,2410	
3	1000	2,919	0,0994	2,960
4	1000	3,002	0,0857	
5	1050	1,363	0,0319	1,376
6	1050	1,388	0,0384	
7	1100	3,944	0,6533	4,182
8	1100	4,420	0,2302	

A Figura 10 demonstra o gráfico que relaciona os valores médios combinados da força de avanço das amostras, com os valores da dureza média para cada temperatura de pré-sinterização. A linha pontilhada no gráfico é a linha de tendência, gerada a partir dos valores da força de avanço.

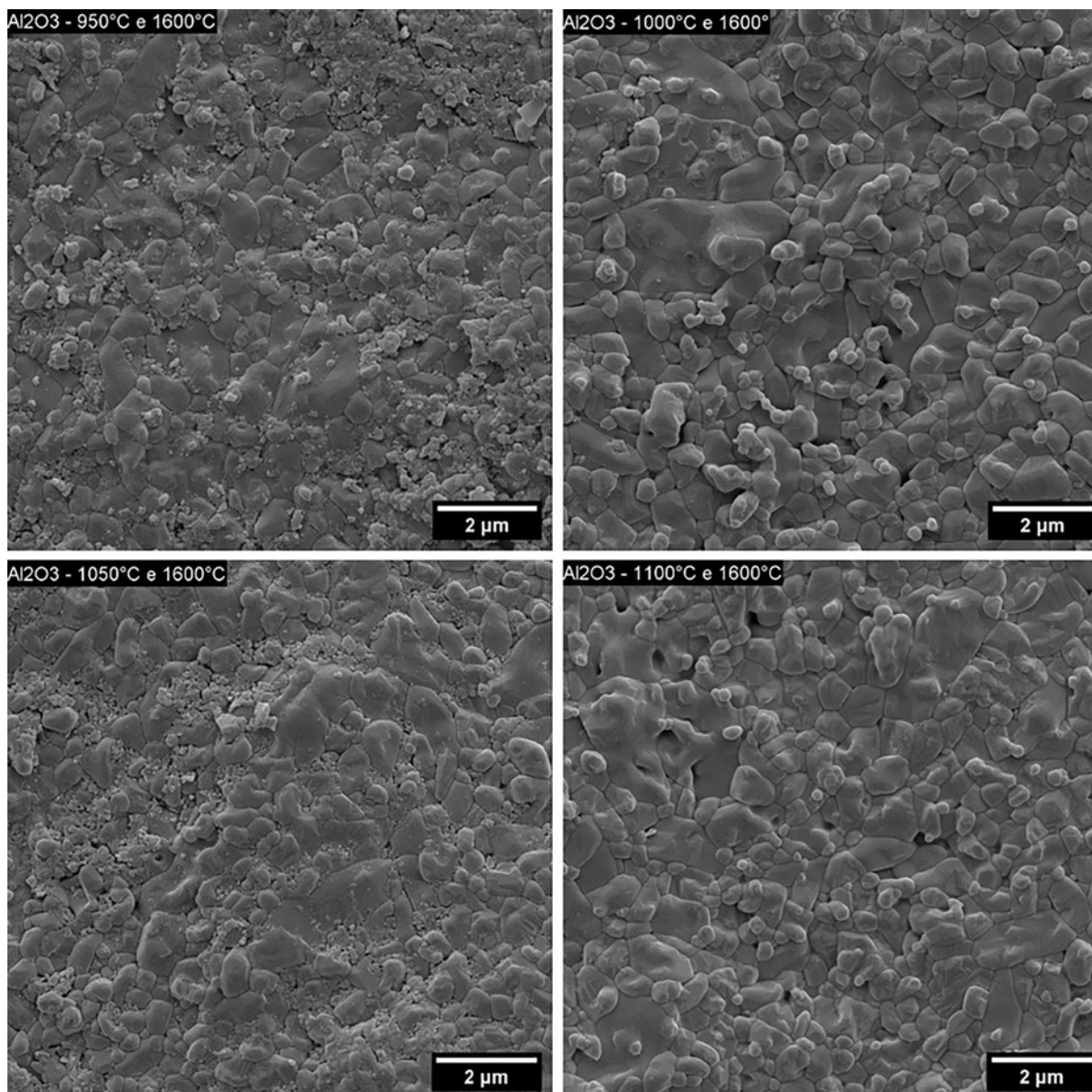


**Figura 10:** Gráfico da força de avanço e dureza para cada temperatura de pré-sinterização.

Os resultados indicam que as forças de avanço aumentam significativamente com a elevação da temperatura de pré-sinterização, atingindo seu valor máximo a 1100°C. O crescimento dos grãos começa a se pronunciar em temperaturas mais elevadas, resultando em uma microestrutura mais densa, o que confere ao material uma dureza significativamente maior. Isso, por sua vez, eleva a força de avanço e, conseqüentemente, a força de usinagem. Observou-se que a força de avanço registrada a 1000°C é significativamente maior do que a força observada a 1050°C. Esse comportamento pode ser atribuído a falhas internas no material, considerando que o processamento para a elaboração do corpo de prova é complexo e depende de vários fatores. Além do que, de modo geral as forças são extremamente baixas.

### 3.5. Acabamento superficial sinterizado

As amostras pré-sinterizadas, após a usinagem, foram sinterizadas em 1600°C com patamar de 2 horas visando avaliar a influência da usinagem no acabamento superficial e na densificação do corpo de prova. A Figura 11 mostra as imagens do MEV da superfície das amostras após a sinterização. Essas imagens são uma ampliação em 10.000 vezes.

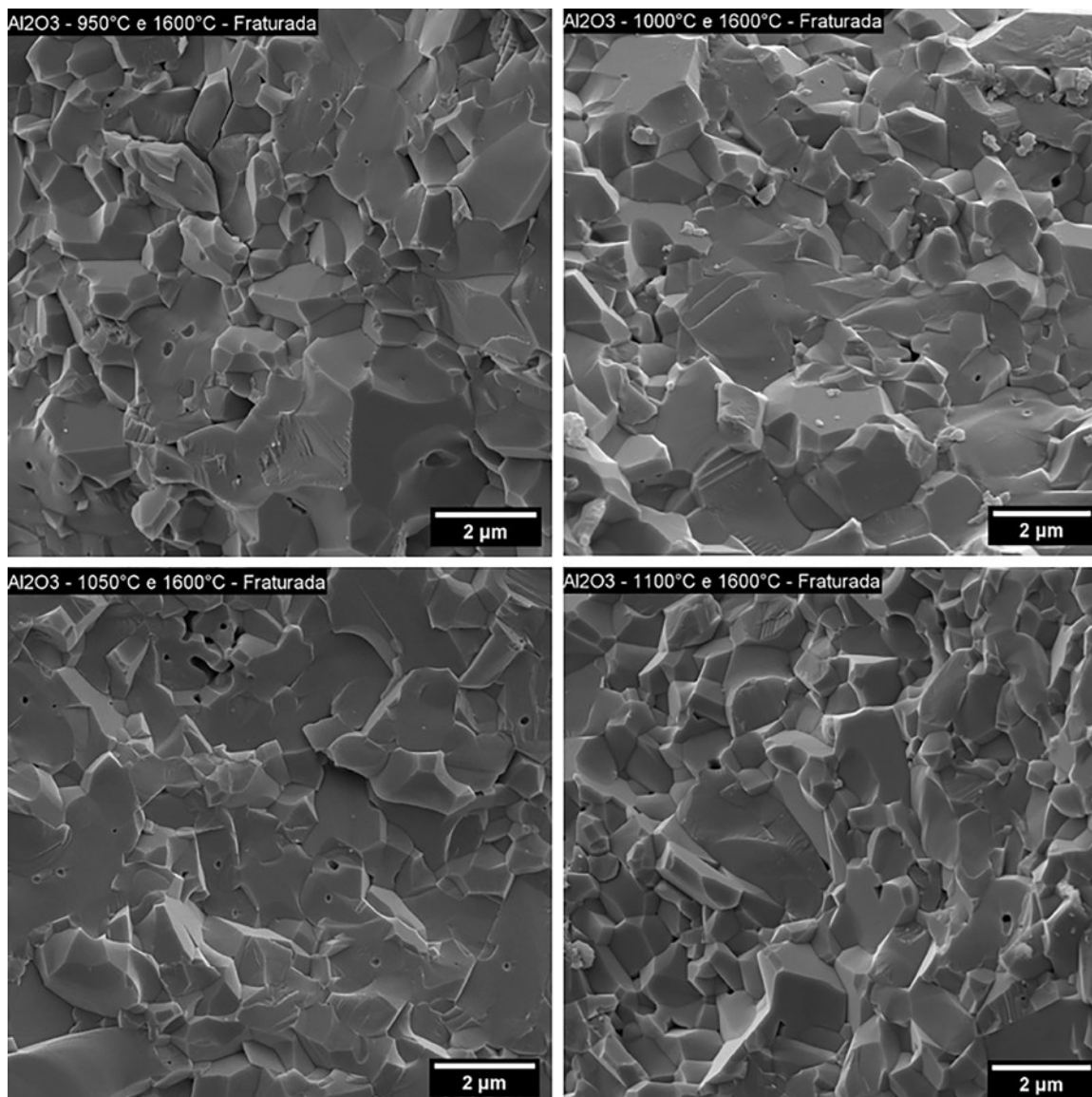


**Figura 11:** Imagens do MEV da superfície das amostras.

De forma geral, as imagens indicam que não houve uma variação significativa na superfície das amostras, independentemente das diferentes temperaturas de pré-sinterização utilizadas. Isso sugere que, nas condições avaliadas, a etapa de pré-sinterização, seguida pela usinagem não teve um impacto relevante na superfície após a sinterização final a 1600°C por 2 horas.

Nas amostras pré-sinterizadas a 950°C e 1050°C, foram observados a presença de resíduos entre os grãos, resultantes do acúmulo de cavacos e pó cerâmico gerados durante a usinagem. A limpeza desses resíduos é dificultada pela baixa resistência dos compactos, que pode causar danos ao material.

A Figura 12 mostra as imagens do MEV das amostras fraturadas intencionalmente depois de serem sinterizadas nas mesmas condições citadas anteriormente, em 1600°C com patamar de 2 horas. Essas imagens são uma ampliação em 10.000 vezes.



**Figura 12:** Imagens do MEV das amostras fraturadas.

Nas imagens apresentadas na Figura 12, observamos grãos bem formados e coesos, indicando uma microestrutura densa e uniformemente distribuída. As fraturas identificadas são tanto intergranulares quanto transgranulares, sugerindo a ocorrência de diferentes mecanismos de propagação de trincas. Além disso, não se observa uma diferença significativa no tamanho de grão entre as amostras pré-sinterizadas em diferentes temperaturas, o que indica que as condições de pré-sinterização não afetaram substancialmente o crescimento dos grãos durante a sinterização final.

Por fim, é verificado que a temperatura ideal para usinagem dentre as quatro em análise é a de 950°C, pois apresenta uma menor dureza, como consequência, menor desgaste da ferramenta de corte e uma menor força de avanço, exigindo menos da máquina. O compacto em 950° C apresenta uma dureza e densificação adequada para usinagem e geometria complexa. Com a microscopia eletrônica de varredura se confirma a baixa relevância das temperaturas de pré-sinterização no acabamento da superfície da alumina, já que o acabamento superficial não apresentou variações significativas pelas variações de temperaturas empregadas.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar o efeito da temperatura de pré-sinterização no processo de torneamento e sua influência na sinterização do compacto. Dessa forma, foi possível concluir que: A retração linear é maior conforme o aumento da temperatura, fato importante para produção de peças com geometria complexas, na qual emprega-se o termo “*near-net-shape*”.

Quanto maior a temperatura de pré-sinterização maior a densificação do compacto, isso propicia uma melhor resistência mecânica do compacto, o que facilita o manuseio da peça;

As forças de avanço aumentam significativamente com a elevação da temperatura de pré-sinterização, atingindo seu valor máximo a 1100°C;

Na literatura, há poucos estudos sobre a usinagem de cerâmica em verde, especialmente pelo processo de torneamento. Este estudo compreendeu a relação entre o processo de pré-sinterização e a usinagem, além de avaliar a influência das diferentes temperaturas de pré-sinterização na sinterização final. Os resultados indicaram que, independentemente da variação na temperatura de pré-sinterização, não há influência na estrutura final da peça, desde que posteriormente todas sejam sinterizadas da mesma forma. Portanto, a temperatura de pré-sinterização a 950°C é ideal para usinagem, oferecendo menor dureza, desgaste reduzido da ferramenta, menor exigência da máquina e um bom acabamento superficial, sem impacto significativo das variações de pré-sinterização.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] DEBNATH, K., SINGH, I., DVIVEDI, A., “Rotary mode ultrasonic drilling of glass fiber-reinforced epoxy laminates”, *Journal of Composite Materials*, v. 49, n. 8, pp. 949–963, 2015. doi: <http://doi.org/10.1177/0021998314527857>.
- [2] ANJOS, R.D., SALOMÃO, R., PANDOLFELLI, V.C., “Novas técnicas de reometria aplicadas a suspensões cerâmicas”, *Cerâmica*, v. 51, n. 318, pp. 173–179, 2005. doi: <http://doi.org/10.1590/S0366-69132005000200017>.
- [3] NORDIN, N.N.M., ISMAIL, N.H., MOHAMAD, D., *et al.*, “Characterisation and properties of Nanohybrid Dental Composite (NhDC) reinforced with zirconia and alumina”, *Brazilian Journal of Oral Sciences*, v. 23, pp. e242664, 2024. doi: <http://doi.org/10.20396/bjos.v23i00.8672664>.
- [4] KUMAR, A.S., DURAI, A.R., SORNAKUMAR, T., “Development of alumina-ceria ceramic composite cutting tool”, *International Journal of Refractory & Hard Metals*, v. 22, n. 1, pp. 17–20, 2004. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2003.10.005>.
- [5] MARGARIDO, A., “Estudo da influência da força de corte da usinagem a verde nas propriedades mecânicas de cerâmicas sinterizadas”, Tese de M.Sc., USP, São Carlos, SP, Brasil, 1994.
- [6] JANSSEN, J.J.M., KALKMAN, C.J., GROBBEE, D.E., *et al.*, “The risk of severe postoperative pain: modification and validation of a clinical prediction rule”, *Anesthesia and Analgesia*, v. 107, n. 4, pp. 1330–1339, 2008. doi: <http://doi.org/10.1213/ane.0b013e31818227da>. PubMed PMID: 18806049.
- [7] SILVA, A.A., MORENO SILVA, L.H., GENOVA, L.A., “Otimização do processo de usinagem de componentes de alumina a verde e parcialmente sinterizados em fresadora CNC”, In: *CBECIMat*, pp. 1308–1318, Foz do Iguaçu, 2018.
- [8] EL-WARDANY, T., BARTH, R., HOLOWCZAK, J., *et al.*, “Optimum process parameters to produce green ceramic complex parts”, *CIRP Annals*, v. 58, n. 1, pp. 109–112, 2009. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.105>.
- [9] GONÇALVES, M., SANCHEZ, L.E.D.A., INGRACI, R.R., *et al.*, “Análise do acabamento superficial e força de corte no torneamento de alumina a verde”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 20, n. 2, pp. 480–490, 2015. doi: <http://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0048>.
- [10] LIU, Y., DENG, J., WU, F., *et al.*, “Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics”, *Wear*, v. 372-373, pp. 91–103, 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.001>.
- [11] SANCHEZ, L.E.A., BUKVIC, G., FIOCCHI, A.A., *et al.*, “Allowance removal from green pieces as a method for improvement surface quality of advanced ceramics”, *Journal of Cleaner Production*, v. 186, pp. 10–21, 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.072>.
- [12] BUKVIC, G., “Usinagem a verde voltada à melhoria da distorção e acabamento superficial de cerâmicas sinterizadas”, Tese de M.Sc., UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2011.
- [13] LI, J.Z., WU, T., YU, Z.-Y., *et al.*, “Micro machining of pre-sintered ceramic green body”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 3, pp. 571–579, 2012. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.030>.
- [14] GONÇALVES, M.J., FRANÇA, T.V., FORTULAN, C.A., *et al.*, “Green ceramic machining benefits through ultrasonic-assisted turning: an experimental investigation”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 118, pp. 3091–3104, Oct. 2021.

- [15] KAVASHIMA, L.H., SANCHES, M.G., SOUSA, E.A.C., *et al.*, “Análise da microdureza Vickers de zircônia Y-TZP pré-sinterizada para a usinagem e posterior aplicação como copings”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 2, pp. e11817, 2017. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0149>.
- [16] DEMARBAIX, A., RIVIÈRE-LORPHEVRE, E., DUCOBU, F., *et al.*, “Behaviour of pre-sintered Y-TZP during machining operations: Determination of recommended cutting parameters”, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 32, pp. 85–92, 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.020>.
- [17] ZUCUNI, C.P., GUILARDI, L.F., FRAGA, S., *et al.*, “CAD / CAM machining Vs pre-sintering in-lab fabrication techniques of Y-TZP ceramic specimens: Effects on their mechanical fatigue behavior”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 71, pp. 201–208, 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.03.013>. PubMed PMID: 28343087.
- [18] SCHROETER, R.B., BASTOS, C.M., CRICHIGNO FILHO, J.M., “Simulation of the main cutting force in Crankshaft turn broaching”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, n. 12–13, pp. 1884–1892, 2007. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.03.008>.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C373-18R23 Standard Test Methods for Determination of Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Non-Tile Fired Unglazed Ceramic Whiteware Products, Glazed or Unglazed Ceramic Tiles, and Glass Tiles*, West Conshohocken, ASTM International, 2023.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C1327-15 Standard Specification for Dense Cast Refractories*, West Conshohocken, ASTM International, 2015.
- [21] GONÇALVES, M.J., SANCHEZ, A.L.E., FRANÇA, T.V., *et al.*, “Analysis of the tool nose radius influence in the machining of a green ceramic material”, Tese de D.Sc., Bauru, SP, Brasil, 2019.
- [22] MAIER, H.R., MICHAELI, N., “Green machining of alumina”, *Key Engineering Materials*, v. 132–136, pp. 436–439, 1997. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.132-136.436>.
- [23] CORACINI, G.A., GONÇALVES JUNIOR, M., “Desenvolvimento de uma bancada de ensaio para processos de torneamento”, In: *Científica Digital, Open Science Research XV*, São Paulo, Brasil, Científica Digital, 2024. doi: <http://doi.org/10.37885/240416266>.
- [24] HONDO, T., KATO, Z., YASUDA, K., *et al.*, “Coarse pore evolution in dry-pressed alumina ceramics during sintering”, *Advanced Powder Technology*, v. 27, n. 3, pp. 1006–1012, 2016. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apt.2016.04.009>.
- [25] BARSOUM, M. W., *Fundamentals Of Ceramics, Series in Materials Science and Engineering.*, New York, Taylor and Francis, 2003.
- [26] SANTOS, I., ARANTES, V.L., PAULA, R.N., *et al.*, “Densificação e evolução microestrutural de cerâmicas”, *Cerâmica*, v. 46, n. 299, pp. 152–155, Set. 2000. doi: <http://doi.org/10.1590/S0366-69132000000300006>.
- [27] MACHADO, A.R. *Teoria da Usinagem dos Materiais*, 3. ed., São Paulo, Edgard Blucher, 2015.