

## OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA TEXTURIZAÇÃO DE IMPLANTES DENTÁRIOS

Tarcísio Ladeia de Oliveira<sup>1</sup>

Renato Goulart Jasinevicius<sup>2</sup>

Jonas de Carvalho<sup>3</sup>

Alessandro Roger Rodrigues<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP), Av. Trabalhador São-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos - SP

<sup>1</sup> tarcisio.oliveira@usp.br, <sup>2</sup> renatogj@sc.usp.br, <sup>3</sup> prjonas@sc.usp.br, <sup>4</sup> roger@sc.usp.br

**Resumo.** A textura superficial de implantes se mostra importante para diminuir a intensidade da resposta imune do corpo e garantir sua longevidade. Os dentes e ossos são naturalmente porosos e rugosos, portanto, espera-se que uma textura semelhante apresente melhor osseointegração do que texturas mais lisas. Atualmente, no caso de implantes dentários, convencionou-se utilizar implantes com rugosidade ( $S_a$ ) entre 1 e 2  $\mu\text{m}$ , visto que isso permite melhor osseointegração. Para se obter uma superfície com essas características, podem ser utilizados diversos tipos de tratamentos superficiais, como jateamento abrasivo e ataque ácido, cada um com suas características e faixas de rugosidade. Implantes torneados são normalmente associados a superfícies mais lisas ( $S_a$  menor que 1  $\mu\text{m}$ ), porém, como os parâmetros de corte podem ser facilmente variados, a faixa de rugosidades possíveis é consideravelmente maior, especialmente com o uso de métodos como torneamento ultrassônico elíptico. Portanto, esse método de fabricação é mais flexível que os tratamentos comumente usados quanto à faixa de rugosidades que pode atingir, além do resultado ser mais consistente. Porém, para obter a superfície desejada, atualmente é necessário realizar procedimentos experimentais, que podem ser demorados e/ou custosos, ou se basear em funções obtidas empiricamente. Este artigo, portanto, visa desenvolver um método mais geral para calcular-se os parâmetros de corte necessários para a obtenção da superfície desejada, baseado em simulação topográfica e otimização convencional. O método consiste no uso de funções de forma que sejam capazes de reproduzir o formato da superfície a ser obtida para um determinado conjunto de parâmetros de corte (baseando-se especificamente no avanço e na velocidade de corte) e no uso de métodos de otimização por gradiente para variar esses parâmetros de forma a obter a superfície desejada. O método foi implementado e testado considerando um problema de maximização da superfície e restrição da rugosidade, problema desenvolvido com base nos requisitos de implantes dentários. A implementação se mostrou capaz de consistentemente obter a superfície com as características desejadas. Porém, foi utilizado um modelo matemático simplificado e não foi realizada validação experimental, questões que serão abordadas em pesquisas futuras.

**Palavras-chave:** Otimização; Parâmetros de corte; Implantes dentários; Torneamento

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das etapas cruciais para a fixação a longo prazo de um implante dentário é o desenvolvimento de estabilidade secundária, também denominada *osseointegração* (Resnik, 2021). A estabilidade secundária consiste no desenvolvimento de estabilidade biomecânica do implante, resultado da regeneração do osso ao seu redor, de forma a resultar em uma fixação rígida. Ela se contrapõe à estabilidade primária, obtida pela metodologia de fixação e a macroestrutura do implante (Resnik, 2021).

Após a implantação, inicia-se um processo de remodelação do osso ao redor. O trauma do processo de implantação resulta na progressiva necrose por compressão do tecido em contato, diminuindo a estabilidade, e o processo de regeneração se inicia concomitantemente (Smeets *et al.*, 2016). Como consequência, esse processo de adaptação resulta em uma queda temporária na estabilidade (Fig. 1), mas que pode resultar na rejeição do implante caso seja prolongada ou acentuada.

Portanto, a minimização da intensidade dessa queda da estabilidade é crucial para se evitar uma falha prematura do implante. Isso pode ser realizado pela combinação de duas estratégias: maximização da estabilidade primária e aceleração do desenvolvimento da osseointegração. A primeira estratégia comumente se baseia no uso de macroestrutura especializada (como características da rosca e formato do implante) (Kligman *et al.*, 2021) assim como melhorias na metodologia de implantação (Resnik, 2021). A segunda estratégia envolve criar um ambiente mais propício para a rápida regeneração do osso.

Um dos métodos utilizados para preparar esse ambiente para a osseointegração consiste na texturização da superfície do implante (Le Guéhennec *et al.*, 2007). As características da superfície influenciam fatores como a hidrofilicidade, que por sua vez influencia a adesão de proteínas e tecidos à superfície (Gittens *et al.*, 2014), e a área de superfície, que aumenta o contato entre osso e implante e torna a fixação mais rígida (Kligman *et al.*, 2021). A rugosidade ( $S_a$ ) afeta ambas características, portanto, é uma das principais áreas de investigação. Menores rugosidades tendem a resultar em menores áreas superficiais e menor hidrofilicidade, consequentemente, o uso de maiores rugosidades seria o ideal.

Por outro lado, o aumento da rugosidade também pode facilitar a adesão de bactérias e a formação de biofilme bacteriano, de difícil remoção, o que pode resultar em falha prematura do implante e infecções resistentes a antibióticos (Toumeh *et al.*, 2020). Devido a isso, implantes dentários atualmente tendem a ser fabricados com  $S_a$  entre 1 e 2  $\mu\text{m}$  (Albrektsson

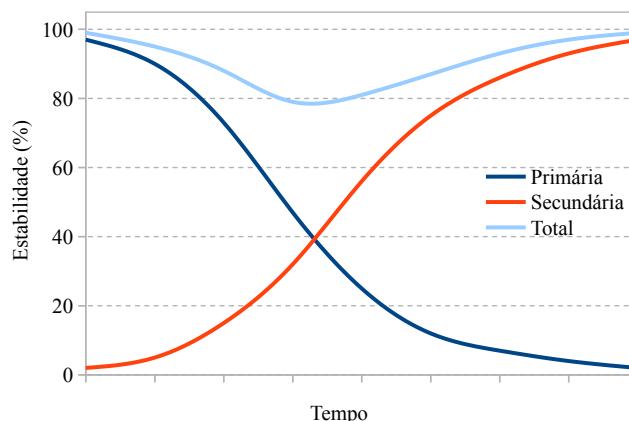


Figura 1. Representação esquemática da evolução da estabilidade do implante ao longo do tempo.

e Wennerberg, 2005; Resnik, 2021).

Para obter rugosidade nessa faixa, comumente são utilizados alguns tipos de tratamentos superficiais, como jateamento abrasivo, ataque ácido e anodização, sendo o processo de torneamento associado à formação de superfícies lisas ( $S_a < 0,5 \mu\text{m}$ ) e minimamente rugosas ( $0,5 \mu\text{m} < S_a < 1 \mu\text{m}$ ) (Coelho *et al.*, 2009). Porém, o processo de torneamento apresenta uma larga faixa de rugosidades possíveis, especialmente o torneamento assistido por vibração, comumente utilizado para facilitar o corte de materiais de baixa usinabilidade, como o titânio comercialmente puro (Brehl e Dow, 2008).

O torneamento assistido por vibração consiste na aplicação de sistemas vibracionais no processo de torneamento (comumente aplicados sobre a ferramenta) como forma de auxiliar no corte do metal. Como consequência, obtém-se maior vida da ferramenta, maior faixa de rugosidades possíveis (sendo possível obter rugosidade de até 10 nm) e maior precisão dimensional (Brehl e Dow, 2008). Destaca-se neste caso o torneamento elíptico ultrassônico, visto que já é aplicado na fabricação de implantes e resulta em considerável aprimoramento da usinabilidade e do acabamento (Saptaji *et al.*, 2018).

Embora comumente seja utilizado para obter superfícies mais lisas, o torneamento elíptico ultrassônico também pode ser utilizado para aplicar texturas com diferentes rugosidades, ajustando-se os parâmetros de corte e os parâmetros de vibração (Sajjadi *et al.*, 2019). Dessa forma, os implantes dentários poderiam ser fabricados utilizando apenas processos de usinagem, sem necessitar de pós-processamento para texturização. O problema, porém, consiste em encontrar a combinação de parâmetros que permita obter a superfície desejada.

Uma possível abordagem para isso seria o uso de métodos de otimização, com o auxílio de métodos de simulação topográfica. Simulação topográfica consiste no uso de métodos computacionais para simular a topografia obtida por um processo de fabricação com base nos parâmetros a serem utilizados (Liu *et al.*, 2019). Os métodos de otimização são capazes, com isso, de obter os parâmetros de corte necessários para se obter uma superfície com as características desejadas.

O presente artigo visa, portanto, desenvolver um método de otimização de parâmetros de corte utilizando simulação topográfica para maximizar a área superficial com restrição de rugosidade, através do uso de uma modelagem matemática da superfície obtida por torneamento elíptico ultrassônico com base nos parâmetros de corte, utilizando funções contínuas, para seja possível o uso de métodos tradicionais de programação matemática baseados em gradientes.

## 2. METODOLOGIA

A pesquisa se encontra atualmente em estágio inicial, sendo os estudos realizados ainda puramente teóricos e computacionais, mas a realização de validações experimentais está prevista. A modelagem matemática da geometria resultante se baseia em um modelo simplificado do torneamento elíptico ultrassônico, mas será incrementada para representar os resultados práticos com maior precisão.

### 2.1. Modelagem matemática

A modelagem matemática se baseia na soma de três características do processo, que foram modeladas como independentes: a remoção de material ao longo do eixo  $x$  com o formato da ferramenta de corte, formando um padrão retilíneo que se repete ao longo do eixo  $y$ , a geração da textura de formato elipsoidal ao longo do eixo  $x$  e a modelagem das vibrações ao longo do eixo  $x$ . O espaçamento entre os picos é definido pelo avanço  $f$ , e o espaçamento entre as elipses, pela distância  $\Delta_{uet}$ , relacionada à velocidade de corte  $v_c$ . A Figura 2 ilustra esse modelo.

#### 2.1.1. Modelagem da ferramenta

A ferramenta foi modelada como um triângulo com ponta arredondada de raio  $r$  e ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  em relação à vertical (Fig. 3).

As retas laterais se conectam ao arredondamento através dos pontos  $(y_1, z_1)$  e  $(y_2, z_2)$ . Assumindo que cada reta

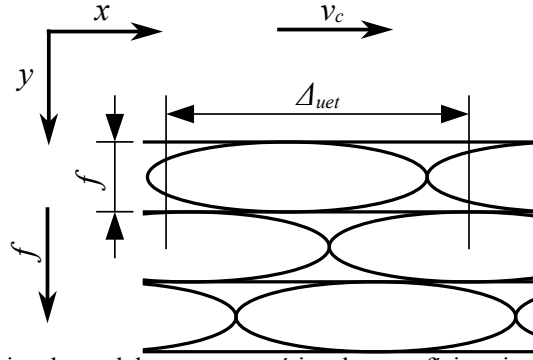


Figura 2. Representação esquemática da modelagem matemática da superfície usinada. As linhas paralelas representam os picos gerados pelas laterais da ferramenta, e as elipses, os contornos das seções de elipsoides gerados pela vibração elíptica.

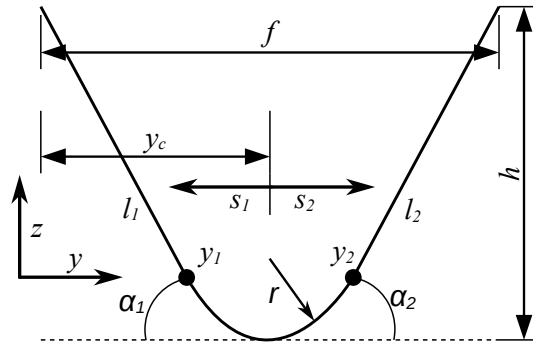


Figura 3. Representação esquemática da geometria da ferramenta de corte.

apresenta derivada igual à do círculo no ponto em que se encontram,  $y_1$  e  $y_2$  podem ser calculados em relação ao centro do círculo por:

$$y_i = \sqrt{\frac{r^2 \tan^2 \alpha_i}{\tan^2 \alpha_i + 1}}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Disso, é possível definir as linhas  $l_1(y) = -\tan \alpha_1 + b_1$  e  $l_2(y) = \tan \alpha_2 + b_2$  em função da geometria da curvatura de raio  $r$ , isto é,  $c(y) = -\sqrt{r^2 - y^2} + r$ , através de:

$$\begin{aligned} b_1 &= -\sqrt{r^2 - y_1^2} + r + \tan \alpha_1 y_1 \\ b_2 &= -\sqrt{r^2 - y_2^2} + r - \tan \alpha_2 y_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Para o correto posicionamento da geometria, é preciso definir uma distância ao centro  $y_c$  de forma que ambos os lados da geometria apresentem a mesma altura  $h$ . Para isso, é primeiramente necessário saber se  $f$  é: (a) maior do que  $y_2 - y_1$ ; (b) menor do que essa distância; ou, caso  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ , (c)  $-y_c > y_1$  e  $f - y_c < y_2$  ou  $-y_c < y_1$  e  $f - y_c > y_2$ . Primeiramente é calculado  $y_c$  assumindo-se o caso (a):

$$y_c = \frac{\tan \alpha_2 f + b_2 - b_1}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} \quad (3)$$

Obtido o  $y_c$  inicial, definem-se as variáveis  $s_1 = -y_c$  e  $s_2 = f - y_c$ , que representam os comprimentos de cada lado da ferramenta, centradas em  $y_c$ , e  $y_c$  é recalculado por:

$$\begin{cases} y_c = \frac{\tan \alpha_2 f + b_2 - b_1}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2}, & \text{se } s_1 < y_1 \text{ e } s_2 > y_2 \\ y_c = \frac{f}{2}, & \text{se } s_1 > y_1 \text{ e } s_2 < y_2 \\ \tan \alpha_1 y_c + b_1 = -\sqrt{r^2 - (f - y_c)^2} + r, & \text{se } s_1 < y_1 \text{ e } s_2 < y_2 \text{ (caso } \alpha_1 < \alpha_2) \\ \tan \alpha_2 (f - y_c) + b_2 = -\sqrt{r^2 - y_c^2} + r, & \text{se } s_1 > y_1 \text{ e } s_2 > y_2 \text{ (caso } \alpha_1 > \alpha_2) \end{cases} \quad (4)$$

Calculando-se  $y_c$ , é possível obter a altura  $h$  por:

$$h = \begin{cases} \tan \alpha_1 y_c + b_1, & \text{se } s_1 < y_1 \text{ e } s_2 > y_2 \\ -\sqrt{r^2 - y_c^2} + r, & \text{se } s_1 > y_1 \text{ e } s_2 < y_2 \\ \tan \alpha_1 y_c + b_1, & \text{se } s_1 < y_1 \text{ e } s_2 < y_2 \text{ (caso } \alpha_1 < \alpha_2) \\ \tan \alpha_2 (f - y_c) + b_2, & \text{se } s_1 > y_1 \text{ e } s_2 > y_2 \text{ (caso } \alpha_1 > \alpha_2) \end{cases} \quad (5)$$

### 2.1.2. Modelagem do movimento elíptico

A textura gerada pelo movimento elíptico é modelada pela geração de porções de elipse de altura  $z_{uet}$  ao longo do eixo  $x$ , com comprimento  $\Delta_{uet}$  (Fig. 4). O movimento elíptico apresenta frequência  $f_{uet}$  e amplitudes  $A_{Zuet}$  e  $A_{Xuet}$ .

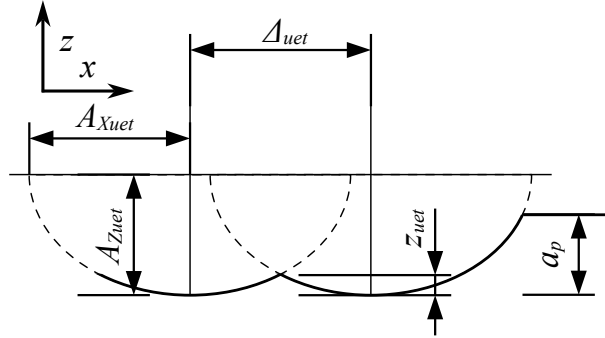


Figura 4. Representação esquemática da textura gerada pelo movimento elíptico, vista lateralmente.

Partindo de Brehl e Dow (2008), com a frequência  $f_{uet}$ , pode-se definir a velocidade de rotação da ferramenta como  $\omega = 2\pi f_{uet}$ . O tempo necessário para um ciclo completo é, portanto:

$$\omega T = 2\pi \Rightarrow T = \frac{1}{f_{uet}}. \quad (6)$$

Isso, porém, requereria a simulação da topografia através do tempo. Para maior agilidade da geração da geometria, e para permitir maior paralelismo da implementação, é mais eficiente o cálculo em função da posição. Disso, podemos definir o tempo  $t$  como:

$$t = \frac{x}{v_c} \quad (7)$$

Consequentemente, a distância que a ferramenta percorre no período  $T$  (isto é,  $\Delta_{uet}$ ) pode ser obtida por:

$$\Delta_{uet} = \frac{v_c}{f_{uet}} \quad (8)$$

Portanto, a altura  $z_{uet}$  pode ser obtida a partir da equação da elipse por:

$$z_{uet} = A_{Zuet} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\Delta_{uet}}{2A_{Xuet}} \right)^2} \right] \quad (9)$$

### 2.1.3. Modelo completo

Partindo das Eq. (5) e (9), é possível definir a profundidade de usinagem ideal considerando  $f$  e  $v_c$ :

$$a_p = h + z_{uet}. \quad (10)$$

Adiciona-se também vibrações aleatórias, modeladas como uma senoide ao longo de  $x$ , com frequência  $f_z$ , amplitude  $A_z$  e fase  $\phi_z$ :

$$z_v(x) = A_z \sin \left( \frac{2\pi f_z x}{v_c} + \phi_z \right) \quad (11)$$

Disso, é possível definir a constante das retas da ferramenta de corte com origem em  $y = 0$ :

$$\begin{aligned} B_1 &= -\sqrt{r^2 - y_1^2} + r - a_p + \tan \alpha_1 (y_c + y_1) \\ B_2 &= -\sqrt{r^2 - y_2^2} + r - a_p - \tan \alpha_2 (y_c + y_2) \end{aligned} \quad (12)$$

E define-se a função da forma da ferramenta  $z_T(y) \leq 0$  no intervalo  $y \in [0, f]$ :

$$z_T(y) = \begin{cases} -\tan \alpha_1 y + B_1, & \text{se } 0 \leq y \leq y_1 \\ -\sqrt{r^2 - (y - y_c)^2} + r - a_p & \text{se } y_1 < y \leq y_2 \\ \tan \alpha_2 y + B_2, & \text{se } y_2 < y \leq f \end{cases} \quad (13)$$

Similarmente, define-se a função da forma da textura elíptica  $z_U(x) \geq 0$  em  $x \in [-\frac{\Delta_{uet}}{2}, \frac{\Delta_{uet}}{2}]$ :

$$z_U(x) = A_{Zuet} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{x}{A_{Xuet}} \right)^2} \right] \quad (14)$$

A profundidade em função da posição  $z(x, y)$  é, portanto, calculada por:

$$z(x, y) = z_T(y) + z_U(x) + z_V(x) \quad (15)$$

Porém,  $z(x, y)$  está definida apenas em um retângulo  $f \times \Delta_{uet}$ . Para ser definida por toda a área desejada, é possível se aproveitar do caráter periódico dos padrões a serem gerados. Isso pode ser feito, por exemplo, de forma análoga ao operador *módulo*, que apresenta a propriedade  $0 \leq (I \bmod N) < N$ , com  $I, N \in \mathbb{Z}$ . De forma mais geral, e aplicável aos números reais, pode ser definida a função  $N(\chi, \delta)$ :

$$N(\chi, \delta) = \left\lfloor \frac{\chi}{\delta} \right\rfloor, \quad (16)$$

em que  $\lfloor \cdot \rfloor$  é a função piso. Dessa forma,  $[\chi - N(\chi, \delta)\delta] \in [0, \delta)$ . Porém, a função piso não é diferenciável, o que torna necessário o uso de uma aproximação diferenciável. Para esta implementação, foi utilizada uma aproximação contínua baseada em uma aproximação da função dente de serra (Helbling, 2020):

$$\text{sfloor}(w) = w - \frac{\pi + [1 - 2 \arccos((1 - \varepsilon_f) \sin(\pi \frac{2w-1}{2}))] 2 \arctan\left(\frac{\sin(\pi w)}{\varepsilon_f}\right)}{2\pi}, \quad (17)$$

em que  $\varepsilon_f$  é uma constante tal que  $\varepsilon_f \rightarrow 0$  aproxima  $\text{sfloor}(w)$  da função piso. Essa aproximação, porém, apresenta dois problemas:  $\text{sfloor}(0) = -0.5$  e, quando  $w \rightarrow 0$ ,  $\text{sfloor}(w) < 0$ . Isso foi remediado pela adição de um valor constante  $\varepsilon_y$  a  $w$  quando necessário e pelo uso de uma aproximação contínua da função valor absoluto:

$$\text{sabs}(w) = \sqrt{w^2 + \varepsilon_a} \quad (18)$$

em que  $\varepsilon_a$  é uma constante tal que  $\varepsilon_a \rightarrow 0$  aproxima  $\text{sabs}(w)$  da função valor absoluto.

Para melhor simular o movimento rotativo do torneamento, pode-se realizar os cálculos com base na distância percorrida pela ferramenta, ao invés de considerar apenas a área sendo simulada. Isso pode ser feito através do uso do perímetro do cilindro, considerando-se a linha de corte analisada. Portanto, obtendo-se tal linha através da função  $N_y(y) = \text{sabs}(N(y + \varepsilon_y, f))$  (isto é, obtendo-se o maior múltiplo de  $f$  que seja menor que  $y$ ), a distância percorrida pode ser calculada por:

$$x_p(x, y) = N_y(y)\pi D + x, \quad (19)$$

em que  $D$  é o diâmetro do cilindro. Consequentemente, a Eq. (15) pode ser reescrita como:

$$z(x, y) = z_T(y - N_y(y)f) + z_U(x_p(x, y) - [N_x(x, y) + 0.5] \Delta_{uet}) + z_V(x_p(x, y)), \quad (20)$$

com  $N_x(x, y) = \text{sabs}(N(x_p(x, y), \Delta_{uet}))$ . A Equação (20) é, portanto, contínua e diferenciável, com continuidade de pelo menos  $C^1$ .

## 2.2. Programação matemática

Para a realização da otimização, foi utilizado um ambiente discretizado com  $W \times H$  pontos, distantes  $1 \mu\text{m}$  entre si vertical e horizontalmente. Disso, é possível calcular a rugosidade dessa área por:

$$S_a(f, v_c) = \frac{1}{WH} \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H \text{sabs}(z(x, y) - z_{med}), \quad (21)$$

em que  $z_{med}$  é a altura do plano médio, calculada como a razão entre o volume da superfície com o plano  $z = 0$  ( $V_0$ ) e a área projetada pela superfície sobre esse plano ( $A_0$ ). Para a área superficial, foi utilizado o método de cálculo de área de topografia descrito por Jenness (2004): o ambiente é subdividido em grupos de  $3 \times 3$  pontos e são calculadas as áreas dos triângulos tridimensionais formados pelos pontos do contorno com o ponto central (Fig. 5). Essas áreas são então somadas e divididas pela área da projeção bidimensional dessa superfície,  $A_0 = (W - 1)(H - 1)$ , obtendo-se com isso a área superficial relativa  $A(f, v_c)$ .

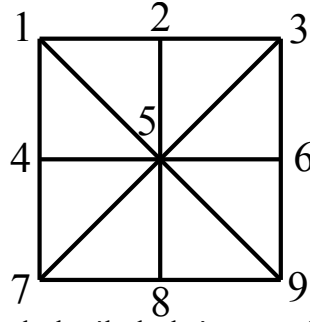


Figura 5. Representação esquemática do método de cálculo da área superficial, ilustrando a disposição dos pontos e dos triângulos formados.

Considerando as necessidades dos implantes dentários, o problema de otimização a ser resolvido consiste na maximização da área superficial com restrição de rugosidade, com rugosidade máxima  $(S_a)_{max}$ , em função dos parâmetros de corte  $f$  e  $v_c$ , isto é:

$$\begin{aligned} &\max A(f, v_c) \\ &\text{sujeito a } S_a(f, v_c) \leq (S_a)_{max} \end{aligned} \quad (22)$$

Seria ideal, porém, que  $S_a(f, v_c)$  resultasse o mais próximo possível de  $(S_a)_{max}$ , ou pelo menos que fosse maior que uma rugosidade mínima, isto é,  $S_a(f, v_c) \geq (S_a)_{min}$ . A Figura 6 apresenta gráficos de  $S_a$  e  $A$  que ilustram o comportamento dessas funções. Nota-se que ambas são predominantemente crescentes, portanto, a otimização delas pode ser realizada através de aproximações lineares (programação linear sequencial).

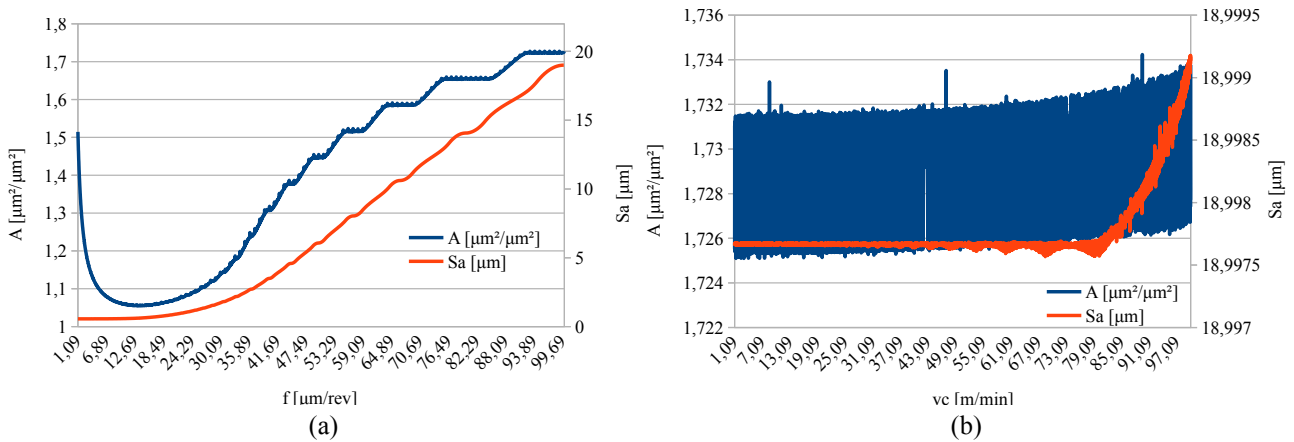


Figura 6. Gráficos de  $S_a$  e  $A$  em função dos parâmetros de corte: (a)  $f \in [1, 100]$  com  $v_c = 50$ ; (b)  $v_c \in [1, 100]$  com  $f = 40$ .

Definindo-se o vetor  $\mathbf{P}_o^K = [f \ v_c]^T$ , a cada iteração  $K$  é possível obter uma reta paramétrica baseada em  $A(\mathbf{P}_o^K)$  por

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_o^K + \lambda \hat{\nabla} A(\mathbf{P}_o^K), \quad (23)$$

em que  $\hat{\nabla}$  simboliza um vetor gradiente unitário e  $\lambda$  é o parâmetro da reta, e um plano baseado em  $S_a(\mathbf{P}_o^K)$  que apresenta

uma estimativa da posição desse plano considerando a restrição imposta, isto é:

$$\hat{\nabla} S_a(\mathbf{P}_o^K) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_o^K) + S_a(\mathbf{P}_o^K) = (S_a)_{max}. \quad (24)$$

A próxima estimativa do conjunto de parâmetros de corte é, portanto, a interseção entre essa reta e esse plano, que pode ser obtida analiticamente. Considerando a estimativa do próximo ponto como  $\mathbf{P}_o^{K+1} = \mathbf{P}_o^K + \lambda^{K+1} \hat{\nabla} A(\mathbf{P}_o^K)$ , é necessário que

$$\hat{\nabla} S_a(\mathbf{P}_o^K) \cdot (\mathbf{P}_o^{K+1} - \mathbf{P}_o^K) = \hat{\nabla} S_a(\mathbf{P}_o^K) \cdot [\lambda^{K+1} \hat{\nabla} A(\mathbf{P}_o^K)] = (S_a)_{max} - S_a(\mathbf{P}_o^K), \quad (25)$$

portanto:

$$\lambda^{K+1} = \frac{(S_a)_{max} - S_a(\mathbf{P}_o^K)}{\hat{\nabla} S_a(\mathbf{P}_o^K) \cdot \hat{\nabla} A(\mathbf{P}_o^K)}, \quad (26)$$

do qual é possível obter o próximo ponto  $\mathbf{P}_o^{K+1}$ , repetindo-se o processo até se atingir a condição de parada. Para este caso, o critério utilizado foi:

$$\left| 1 - \frac{A^K}{A^{K-1}} \right| \leq 10^{-6} \quad (27)$$

O método também apresenta suporte à definição de limites inferiores e superiores para as variáveis sendo otimizadas. Caso uma variável  $p_i \in \mathbf{P}$ ,  $i = 1, \dots, n_P$  ( $n_P$  sendo o número de dimensões de  $\mathbf{P}$ ) exceda o limite inferior  $(p_i)_{min}$  ou superior  $(p_i)_{max}$ , calcula-se um novo  $\lambda^{K+1}$  por:

$$\lambda^{K+1} = \min \left\{ \lambda^{K+1}, \eta_\lambda \frac{(p_i)_{lim} - p_i^K}{(\hat{\nabla} A(\mathbf{P}_o^K))_i} \right\} \quad i = 1, \dots, n_P \quad (28)$$

em que  $(p_i)_{lim}$  é o limite excedido e  $\eta_\lambda$  é uma constante de amortecimento. Para esta pesquisa, foi utilizado  $\eta_\lambda = 0,5$ .

### 2.3. Implementação

Para a avaliação do modelo e do método de otimização descritos, estes foram implementados em C++, e o código-fonte está publicamente disponível (de Oliveira, 2022). Foi utilizada a biblioteca SFML para a visualização da topografia simulada, o padrão YAML foi utilizado para a definição de arquivos de configuração (através da biblioteca yaml-cpp), foi utilizada a biblioteca OpenMP para acelerar os cálculos por programação paralela (Dagum e Menon, 1998) e *scripts* em Python foram também utilizados para auxiliar a visualização dos resultados.

### 2.4. Análise dos resultados

Análises experimentais ainda não foram realizadas, e o modelo ainda precisa ser modificado para se tornar mais próximo aos resultados obtidos por experimentos práticos e já descritos na literatura, como os descritos por Liu *et al.* (2019). Portanto, a presente análise consiste em uma comparação dos resultados em função da resolução (utilizando diferentes valores de  $W$  e  $H$ ) e considerando a versão exata do modelo (isto é, sem a utilização das aproximações contínuas). A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados, com  $W = H \in \{100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800\}$ ,  $(S_a)_{max} = 1,5 \mu\text{m}$ ,  $f \in [1, 100] \mu\text{m/rev}$  e  $v_c \in [40, 100] \text{m/min}$ .

Tabela 1. Parâmetros utilizados para a análise dos resultados.  $f^0$  e  $v_c^0$  são os valores iniciais dos parâmetros de corte.

| Parâmetro       | Valor                | Parâmetro  | Valor              | Parâmetro  | Valor                     |
|-----------------|----------------------|------------|--------------------|------------|---------------------------|
| $\varepsilon_f$ | $10^{-10}$           | $\alpha_1$ | $75^\circ$         | $A_{Xuet}$ | $200 \mu\text{m}$         |
| $\varepsilon_a$ | $10^{-15}$           | $\alpha_2$ | $75^\circ$         | $A_{Zuet}$ | $100 \mu\text{m}$         |
| $\varepsilon_y$ | $10^{-3}$            | $r$        | $10 \mu\text{m}$   | $f_z$      | $3 \times 10^9 \text{Hz}$ |
| $f^0$           | $20 \mu\text{m/rev}$ | $D$        | $120 \mu\text{m}$  | $A_z$      | $0,1 \mu\text{m}$         |
| $v_c^0$         | $60 \text{m/min}$    | $f_{uet}$  | $20.000 \text{Hz}$ | $\phi_z$   | $0^\circ$                 |

## 3. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados das otimizações, e a Fig. 7 apresenta um exemplo da topografia simulada resultante. Nota-se que os valores de  $f$  e  $a_p$  obtidos apresentaram baixa variação, e os valores de  $A$  e  $S_a$  apresentaram variação ainda menor. Por outro lado, houve grande variação de  $v_c$ . Os gráficos da Fig. 6 ilustram a origem dessa questão: o avanço apresenta maior influência sobre a área superficial e a rugosidade, mas, em geral, não há grande variação dessas grandezas com a variação de  $f$ . Com a velocidade de corte, por outro lado, embora ela apresente menor contribuição para essas

duas grandezas, tende a apresentar derivadas de elevada intensidade, tornando o processo de otimização menos estável. Porém, como apresenta baixa influência nos resultados (pelo menos, considerando os parâmetros utilizados), a escolha da velocidade de corte não é tão importante quanto a escolha do avanço e da profundidade de usinagem.

Tabela 2. Resultados dos problemas de otimização realizados com diferentes resoluções.

| <b>W [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>f [<math>\mu\text{m}/\text{rev}</math>]</b> | <b>a<sub>p</sub> [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>v<sub>c</sub> [m/min]</b> | <b>A [<math>\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^2</math>]</b> | <b>S<sub>a</sub> [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Iterações</b> |
|-------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|
| 100                                 | 18,7503                                        | 7,12863                                         | 48,3265                      | 1,26773                                             | 1,49999                                         | 1018             |
| 200                                 | 18,8253                                        | 7,49617                                         | 59,5587                      | 1,25283                                             | 1,50001                                         | 90               |
| 300                                 | 18,8930                                        | 7,60258                                         | 59,9634                      | 1,25459                                             | 1,50001                                         | 406              |
| 400                                 | 18,7950                                        | 7,65594                                         | 66,8489                      | 1,26272                                             | 1,49999                                         | 539              |
| 500                                 | 18,6390                                        | 8,45620                                         | 95,1740                      | 1,25466                                             | 1,49999                                         | 175              |
| 600                                 | 18,8661                                        | 7,40710                                         | 53,6418                      | 1,26307                                             | 1,50000                                         | 289              |
| 700                                 | 18,8178                                        | 7,54101                                         | 61,6465                      | 1,25623                                             | 1,50009                                         | 212              |
| 800                                 | 18,8410                                        | 7,55841                                         | 61,0871                      | 1,26199                                             | 1,50000                                         | 256              |
| <b>Média</b>                        | 18,803                                         | 7,606                                           | 63,3                         | 1,25923                                             | 1,50001                                         | 373              |
| <b>Desvio padrão</b>                | 0,0793                                         | 0,380                                           | 14,0                         | 0,00533                                             | 0,0000334                                       | 295              |

O uso de programação paralela contribuiu para a aceleração do processo de otimização. Com o uso de  $W \times H$  pontos, é necessário realizar  $3 \times W \times H$  cálculos relacionados à posição (cálculo de  $z(x, y)$ ,  $\frac{\partial z(x, y)}{\partial f}$  e  $\frac{\partial z(x, y)}{\partial v_c}$ ) seguidos por 7 cálculos de redução, isto é, utilização desses pontos para obter um único valor ( $A, S_a, z_{med}, \frac{\partial A}{\partial f}, \frac{\partial S_a}{\partial f}, \frac{\partial A}{\partial v_c}, \frac{\partial S_a}{\partial v_c}$ ), portanto, o uso de múltiplos núcleos, em conjunto com o fato desses cálculos serem trivialmente paralelizáveis, contribui para acelerar consideravelmente esse processo. Porém, devido às imprecisões inerentes às representações de ponto flutuante (IEEE, 2019) e o padrão OpenMP não necessariamente garantir uma ordem determinística de início e término dos processos concorrentes (OpenMP, 2021), ocorrem leves distorções dos resultados ao longo do processo, o dotando de um caráter não-determinístico. Embora isso dificulte a reprodução exata dos resultados, isso também permite que diferentes resultados sejam obtidos simplesmente executando o programa novamente.

No caso dessa análise, não há relação aparente entre número de iterações e a resolução utilizada. Embora aparente haver uma tendência a resoluções menores necessitarem de mais iterações, esse número pode variar de uma execução para outra devido ao efeito da programação paralela. Porém, deve-se considerar também que, com o aumento da resolução, aumenta-se o tempo necessário por iteração, portanto, o número de iterações por si não é um indicador de velocidade de resolução.

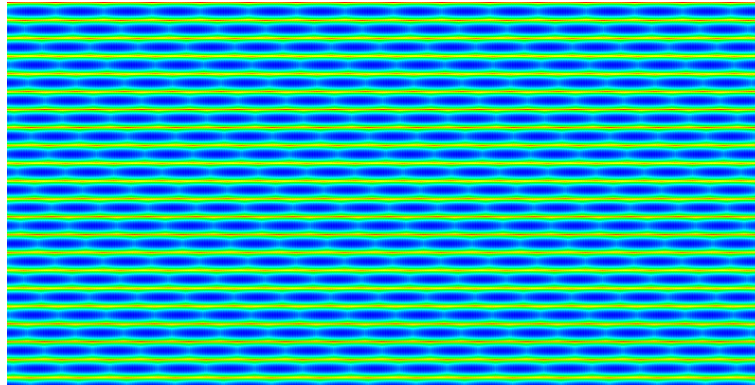


Figura 7. Detalhe da topografia simulada para  $W = 800$ .

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo uso dos parâmetros de corte obtidos no processo de otimização para recalculer os valores de área e rugosidade sem o uso das aproximações contínuas. Como evidenciam os resultados, os valores obtidos são próximos aos calculados com o uso das aproximações contínuas, especialmente ao se considerar a média e desvio padrão. As diferenças entre os valores obtidos ( $\Delta A$  e  $\Delta S_a$ ) também deixam isso evidente, com a área “exata” sendo ligeiramente maior e a rugosidade apresentando certa variação nesse quesito, isto é, variando entre ser maior ou menor que a obtida com o uso das aproximações.



Tabela 3. Resultados obtidos sem o uso das aproximações contínuas.

| W [ $\mu\text{m}$ ]  | A [ $\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^2$ ] | S <sub>a</sub> [ $\mu\text{m}$ ] | $\Delta A$ [ $\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^2$ ] | $\Delta S_a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 100                  | 1,26759                             | 1,49998                          | 0,000132161                                  | $-7,91 \times 10^{-5}$         |
| 200                  | 1,25263                             | 1,50009                          | 0,000196344                                  | $1,33 \times 10^{-5}$          |
| 300                  | 1,25441                             | 1,50001                          | 0,000176282                                  | $-6,88 \times 10^{-6}$         |
| 400                  | 1,26270                             | 1,50000                          | 0,000017237                                  | $-2,99 \times 10^{-6}$         |
| 500                  | 1,25460                             | 1,49999                          | 0,000059082                                  | $-7,70 \times 10^{-6}$         |
| 600                  | 1,26284                             | 1,50000                          | 0,000236587                                  | $6,75 \times 10^{-8}$          |
| 700                  | 1,25594                             | 1,50010                          | 0,000282801                                  | $-3,53 \times 10^{-6}$         |
| 800                  | 1,26172                             | 1,50000                          | 0,000267872                                  | $-3,00 \times 10^{-6}$         |
| <b>Média</b>         | 1,25905                             | 1,5000212                        | 0,0001710                                    | $-1,12 \times 10^{-5}$         |
| <b>Desvio padrão</b> | 0,00534                             | 0,0000464                        | 0,0000960                                    | $2,82 \times 10^{-5}$          |

#### 4. CONCLUSÕES

O uso das aproximações contínuas se mostrou uma forma satisfatória de gerar uma aproximação contínua das funções objetivo e de restrição. Através delas, foi possível calcular os gradientes dessas funções e, com isso, realizar uma otimização baseada em gradientes capaz de obter parâmetros de corte satisfatórios para os requisitos das superfícies de implantes dentários. As áreas e rugosidades calculadas também se mostraram próximas às calculadas sem o uso dessas aproximações, validando o uso das mesmas.

Com o modelo matemático utilizado, os resultados também se mostraram praticamente independentes da resolução utilizada. Porém, o modelo não abrange questões que poderiam influenciar o cálculo da área e rugosidade em cortes que apresentam maiores extensões, como vibrações de menor frequência e desgaste da ferramenta. Isso, portanto, deverá ser analisado novamente após a incrementação do modelo utilizado.

Para trabalhos futuros, o modelo matemático será melhor alinhado a modelos presentes na literatura, como por Liu *et al.* (2019), e também passará por validação experimental, como forma de analisar a viabilidade do uso desse método de otimização para a texturização de implantes dentários e possíveis outras aplicações.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações — MCTI para a realização desta pesquisa (processo 140441/2022-0).

#### 6. REFERÊNCIAS

- Albrektsson, T. e Wennerberg, A., 2005. The impact of oral implants - past and future, 1966-2042. *Journal of the Canadian Dental Association*, Vol. 71, p. 327.
- Brehl, D. e Dow, T., 2008. Review of vibration-assisted machining. *Precision Engineering*, Vol. 323, p. 153–172.
- Coelho, P.G., Granjeiro, J.M., Romanos, G.E., Suzuki, M., Silva, N.R.F., Cardaropoli, G., Thompson, V.P. e Lemons, J.E., 2009. Basic research methods and current trends of dental implant surfaces. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, Vol. 88B2, p. 579–596.
- Dagum, L. e Menon, R., 1998. OpenMP: an industry standard API for shared-memory programming. *IEEE Computational Science and Engineering*, Vol. 51, p. 46–55.
- de Oliveira, T.L., 2022. textopt - optimization of cutting parameters based on fast topography simulation. <<https://doi.org/10.5281/zenodo.7340055>>.
- Gittens, R.A., Scheideler, L., Rupp, F., Hyzy, S.L., Geis-Gerstorfer, J., Schwartz, Z. e Boyan, B.D., 2014. A review on the wettability of dental implant surfaces II: Biological and clinical aspects. *Acta Biomaterialia*, Vol. 107, p. 2907–2918.
- Helbling, C., 2020. Smooth floor function. Mathematics Stack Exchange. 12 Oct. 2022 <<https://math.stackexchange.com/q/3850631>>.
- IEEE, 2019. IEEE 754-2019. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8766229>>.
- Jenness, J.S., 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*, Vol. 323, p. 829–839.
- Kligman, S., Ren, Z., Chung, C.H., Perillo, M.A., Chang, Y.C., Koo, H., Zheng, Z. e Li, C., 2021. The impact of dental implant surface modifications on osseointegration and biofilm formation. *Journal of Clinical Medicine*, Vol. 108.
- Le Guéhennec, L., Soueidan, A., Layrolle, P. e Amourig, Y., 2007. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*, Vol. 237, p. 844–854.
- Liu, X., Wu, D., Zhang, J., Hu, X. e Cui, P., 2019. Analysis of surface texturing in radial ultrasonic vibration-assisted turning. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 267, p. 186–195.

- OpenMP, 2021. OpenMP API 5.2 specification. OpenMP Application Programming Interface. <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8766229>>.
- Resnik, R., 2021. *Misch's Contemporary Implant Dentistry*. Elsevier, Canada.
- Sajjadi, S.A., Lotfi, M., Amini, S., Toutounchi, H. e Bagheri-Bami, A., 2019. Improving the surface energy of titanium implants by the creation of hierarchical textures on the surface via three-dimensional elliptical vibration turning for enhanced osseointegration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 233, p. 1226–36.
- Saptaji, K., A. G. M. e Azhari, A., 2018. Machining of biocompatible materials: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97.
- Smeets, R., Stadlinger, B., Schwarz, F., Beck-Broichsitter, B., Jung, O., Precht, C., Kloss, F., Gröbe, A., Heiland, M. e Ebker, T., 2016. Impact of dental implant surface modifications on osseointegration. *BioMed Research International*, Vol. 2016, p. 1–16.
- Toumeh, T., Sghaireen, M., Ganji, K., Mathew, M., Nagy, A. e Rao, K., 2020. A review on biofilm and biomaterials: Prosthodontics and periodontics perspective. *Journal of International Oral Health*, Vol. 12, p. 504.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

# NUMERICAL OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS FOR TEXTURIZATION OF DENTAL IMPLANTS

Tarcísio Ladeia de Oliveira<sup>1</sup>

Renato Goulart Jasinevicius<sup>2</sup>

Jonas de Carvalho<sup>3</sup>

Alessandro Roger Rodrigues<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo (EESC-USP), Av. Trabalhador São-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, 13566-590, São Carlos - SP

<sup>1</sup> [tarcisio.oliveira@usp.br](mailto:tarcisio.oliveira@usp.br), <sup>2</sup> [renatogj@sc.usp.br](mailto:renatogj@sc.usp.br), <sup>3</sup> [prjonas@sc.usp.br](mailto:prjonas@sc.usp.br), <sup>4</sup> [roger@sc.usp.br](mailto:roger@sc.usp.br)

**Abstract:** The surface texture of implants was shown to be an important factor to decrease the intensity of the body's immunological response and guarantee their longevity. Teeth and bones are naturally porous and superficially rough, therefore, it is expected that a similar texture would display better osseointegration than smoother textures. Currently, regarding dental implants, the application of implants with surface roughness ( $S_a$ ) between 1 and 2  $\mu\text{m}$  is more usual, as that allows for better osseointegration. In order to obtain a surface with such features, many kinds of surface treatments may be used, such as sandblasting and acid-etching, each one having its own characteristics and roughness ranges. Turned implants are normally associated to smoother surfaces ( $S_a$  less than 1  $\mu\text{m}$ ), however, as the cutting parameters may be more easily modified, the possible roughness range is considerably greater, especially when using methods such as ultrasonic elliptical turning. Therefore, this manufacturing method is more flexible than the commonly used treatments regarding the range of roughness it can reach, while also giving more consistent results. However, in order to obtain the desired surface, it is currently necessary to do experimental procedures, which may be take time and/or be costly, or use empirically made functions and regressions. This paper, therefore, aims to develop a more general method in order to calculate the necessary cutting parameters to obtain the desired surface, basing itself on topography simulation and conventional optimization. The method consists on using shape functions which are capable of reproducing the shape of the surface to be obtained for a certain set of cutting parameters (being based specifically on feed rate and cutting speed) and in the use of gradient-based optimization methods to modify such parameters and obtain the desired surface. The method was implemented and tested considering a problem of maximization of surface area with a roughness constraint, problem developed considering the needs of dental implants. The implementation was shown to be capable of consistently obtaining a surface with the desired characteristics. However, a simplified mathematical modeling was used and experimental validation was not done, matters which shall be dealt with in future research.

**Keywords** Optimization; Cutting parameters; Dental implants; Turning

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.