

## **CAD/CAM casting versus método da cera perdida: uma análise de viabilidade técnica e econômica para fabricação de próteses cerâmicas dentárias**

Lílian Cristina Côcco<sup>1</sup>, Marlon Wesley Machado Cunico<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>R&D, Zirclab Medical Devices, Unit 211, The Lightbulb, 1 Filament Walk, Wandsworth, SW18 4GQ, London, United Kingdom

<sup>2</sup>R&D, CONCEP3D, R Pedro Ivo 298, 80010-020, Curitiba, Paraná, Brasil

\*e-mail: marloncunico@yahoo.com.br

### **Resumo**

O objetivo deste estudo é determinar o impacto econômico da fabricação de próteses dentárias usando dois métodos diferentes: tradicional (fundição por cera perdida) e CAD/CAM casting, para obter informações quantitativas confiáveis para o uso eficiente e eficaz de materiais e operações de equipamentos. Modelos econômicos determinísticos 'bottom-up' foram utilizados para comparação de custos e previsão de parâmetros de custos indiretos. Os insumos utilizados para construir os modelos concentraram-se nos custos de materiais (porcelana avançada), equipamentos (sistema CAD/CAM; fornos e 'hotpress'), além de mão de obra, bem como no tempo necessário para concluir todas as etapas de ambas as técnicas. Os modelos mostraram que o processo CAD/CAM tinha um custo de investimento mais elevado, porém com um retorno sobre o investimento (ROI) menor, resultando num período de retorno mais curto, de 3 a 4 anos, com uma taxa de produção de 16 coroas por dia. A técnica tradicional tem um período de retorno de 5 a 6 anos para uma operação semelhante. Como esperado, o método tradicional é menos dispendioso para baixa produção diária, enquanto o CAD/CAM é menos dispendioso para grandes produções. No entanto, existe uma faixa intermediária onde o custo de ambos os métodos é semelhante (6 a 16 coroas por dia). É possível constatar que à medida que a demanda cresce, mais técnicos são necessários, afetando principalmente o custo do método tradicional. Em contrapartida, o custo do equipamento afeta diretamente a técnica CAD/CAM. Portanto, pode-se concluir que os modelos desenvolvidos podem prever as condições de produção para as duas técnicas analisadas com razoável precisão e que a mesma metodologia pode ser utilizada para avaliação de outras tecnologias odontológicas.

**Palavras-chave:** Coroa dentária; modelo de custo; CAD/CAM casting; próteses dentárias; cera perdida; fundição.

### **1. INTRODUÇÃO:**

O custo e a qualidade dos produtos de uma empresa têm um impacto significativo na sua capacidade de competir eficazmente num mercado global. Contudo, calcular o custo de produção de uma peça é uma tarefa significativa, com grande importância para o controle de custos além da manutenção de uma posição competitiva. Uma comparação superficial de técnicas é bastante comum, mas pode afetar a compreensão de um problema, resultando em resposta insuficiente e dificultando o aumento da produção.

O planejamento inicial com custos de mão de obra, programação, processamentos, ferramentas, etc., são inatingíveis quando as despesas são superestimadas. Mesmo quando são definidas estratégias para recuperar os custos subvalorizados, à medida que o projeto avança, fica mais difícil cumprir as metas de custos. A reorganização, o replanejamento e, potencialmente, a adição de funcionários e equipamentos acontecem em resposta e, frequentemente, resultam em despesas que não foram inicialmente planejadas, o que eventualmente aumenta os custos. Contudo, quando os custos são exagerados, a superestimação representa uma aplicação da lei de Parkinson: o dinheiro está aí, por isso deve ser gasto. É uma profecia autorrealizável na qual a redução de custos será quase impossível sem um controle de gestão rigoroso [1,2].

É essencial, neste contexto, encontrar modelos matemáticos capazes de prever situações hipotéticas para fornecer dados que apoiem inúmeras tomadas de decisão. É fundamental ter um conhecimento profundo dos processos que se deseja representar, pois o modelo final deve ser eficaz na previsão de alguns cenários. Dentre os diversos mercados existentes, podem-se aplicar conceitos de modelagem econômica à indústria de próteses dentárias, que é crítica para a saúde pública e afeta grande parte da população mundial.

As duas técnicas mais populares usadas pelos dentistas para criar próteses dentárias com cerâmica avançada são a tradicional cera perdida e o CAD/CAM casting e ambos os métodos envolvem um conhecimento profundo dos materiais, ferramentas e procedimentos manuais para produzir uma prótese de alta qualidade com boa aceitação pelo cliente. Ambas as técnicas são aceitáveis [3] e, devido ao seu significado histórico, a conhecida tecnologia de cera perdida tradicional ainda é usada como referência para comparação de tecnologias alternativas de fabricação [4].

O padrão de cera é necessário para qualquer restauração que envolva fundições (técnica de cera perdida) e é utilizado para confeccionar próteses totalmente metálicas com cerâmica ou resinas, bem como próteses totalmente cerâmicas [5-7] e o material requer bastante conhecimento e habilidade para ser manipulado com precisão [8,9]. É bem conhecido que a preparação tradicional do padrão de cera leva muito mais tempo do que a técnica CAD/CAM, que utiliza máquinas com ferramentas para criar o padrão [10]. Além disso, apesar do alto custo da máquina CAD/CAM, ela produz restaurações precisas devido ao escaneamento intraoral ou escaneamento de moldes 3D, o que elimina alguns erros humanos [11].

Profissionais em geral têm um conhecimento básico do custo destas técnicas, mas desconhece como isso afeta o seu negócio e, neste momento, não existe dados suficientes para prever a sua rentabilidade. Portanto, este artigo fornece evidências sobre como os fabricantes de próteses dentárias poderiam aumentar a produção para atender ao aumento de demanda, utilizando estas duas tecnologias atuais e, examina os fatores que determinam seu impacto de produção, como material, mão-de-obra e equipamentos. A comparação do método tradicional com o CAD/CAM casting destaca os pontos fortes de cada técnica e ajuda a todos os profissionais a fazerem seleções competentes, para atender a quaisquer mudanças previstas na demanda no setor odontológico.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Com relação à análise da demanda, as abordagens determinísticas devem oferecer uma estimativa completa que inclua o preço unitário mais preciso para cada componente do projeto. Para obter uma estimativa totalmente detalhada, todos os custos, incluindo custos diretos e indiretos da planta, custos de mão de obra e assim por diante, devem ser especificados. Quando se trata de métodos determinísticos, é necessário um bom nível de precisão para determinar as quantidades e custos envolvidos, bem como um nível de esforço, que pode levar horas para concluir o estudo. O nível do processo determina as atividades elementares a serem estimadas, que devem então ser dimensionadas para estimar o custo individual de cada uma delas. Resumir as estimativas geradas usando a abordagem 'bottom-up' é a maneira mais simples de compilá-las. A estimativa ascendente é um método para estimar a duração ou o custo do projeto, agregando estimativas dos componentes de nível mais baixo da estrutura analítica do projeto. Essas estimativas são então somadas para formar um valor total para a duração e o custo de cada atividade [12].

Os principais componentes dos custos das parcelas podem ser separados em custos diretos e indiretos seguindo uma classificação geral [13-15]. O custo administrativo foi omitido da análise porque

o objetivo principal deste artigo é comparar apenas os componentes do processo. Para comparar os custos das peças usando técnicas de produção tradicional e de CAD/CAM casting, foram selecionados os custos das peças primárias e criados modelos de estimativa de custos para esses componentes.

### 2.1. Estimativa de parâmetros de entrada para modelos econômicos:

Este processo de estimativa consiste em cinco etapas:

- 1) Determinar a quantidade de materiais e possibilidades de dimensionamento para tipos específicos de próteses, bem como um preço de venda esperado. A Tab.1 apresenta os parâmetros para três diferentes tipos de próteses, com batelada de 10 unidades para coroas. Observar que os parâmetros são proporcionais ao tipo de prótese.

**Tabela 1.** Parâmetros das próteses

Tipo	Massa (g)	Preço em Laboratório (US\$)	Batelada de sinterização
Coroa	0,5	100	10
Ponte 2x2	1	200	5
Ponte 3x2	1,5	300	3

- 2) Adquirir os custos dos equipamentos primários e auxiliares (FOB), bem como os custos trabalhistas.
- 3) Cálculo do custo dos materiais cujo representante considerou-se de uma "porcelana avançada" específica para fabricação de próteses dentárias e da quantidade de resíduos produzidos por cada processo, conforme detalhado na Tab.2.
- 4) Determinar os custos de componentes separados, como despesas gerais, máquinas e custos diretos.
- 5) Estimar os gastos dos sistemas completos, com base na abordagem de estudo prévio. Todos os parâmetros apresentados na Tab.2 foram utilizados para calcular os itens 4 e 5 descritos na seção seguinte.

**Tabela 2.** Parâmetro econômicos de ambas as técnicas

Parâmetro	Fundição por cera perdida	CAD/CAM casting
Jornada diária (h)	14	14
$C_{trab}$ (US\$/h)	12	12
Refugo (%)	15	10
Tempo amortização (anos)	2	2
Custo equipamento CNC (US\$)	-	67420
Custo forno fundição extra (US\$)	2000	2000
Custo bancada 3D (US\$)	-	10000
Custo forno hotpress (US\$)	2000	2000
$N_{meses}$	12	12
$N_{diastrab}$	20	20
$C_{peça}/g$	36,20	36,20
$M_{peça}$ (g)	0,5	0,5
$N_{batelada}$ (peças)	10	10
$N_{fabricação}$ (h)	8	8
Preço (US\$)	100	100

### 2.2. Descrição de processo e tempo de processo:

A importância de estudar cada etapa dos processos de forma independente para avaliar e testar o modelo econômico adequado é enfatizado neste estudo, e as informações específicas sobre a quantidade

de tempo necessária para completar cada etapa, bem como a descrição das etapas principais estão descritas na Tab.3. Quando são comparadas as etapas de cada uma das técnicas, pode-se perceber que as três primeiras são as que as distinguem, e a técnica tradicional é mais demorada, o que impacta diretamente no tempo de processamento manual ( $t_{\text{manual}}$ ), que é de 5,38 horas versus 3,47 horas para a técnica CAD/CAM. Além disso, a utilização desse método tradicional resulta em um fluxo de trabalho ( $t_{\text{processo}}$ ) mais longo, o que influencia outros gastos de produção a serem discutidos mais adiante.

Também é importante ter em mente que cada método possui um diferente tempo de máquina requerido. O tempo de duas máquinas é levado em consideração na técnica tradicional (forno e hotpress), mas na técnica CAD/CAM também devem ser consideradas as duas máquinas do processo tradicional além de todo o sistema CAD/CAM.

**Tabela 3.** Etapas detalhadas do processo e consumo de tempo para o método tradicional e CAD/CAM Casting

Etapas de processo	Tradicional	CAD/CAM casting
1	Moldagem manual: Moldagem em gesso a partir de molde de boca; Ajuste molde de gesso; Produção de molde de silicone a partir de molde de gesso ajustado Tempo de processo: 1h	Aquisição de modelo 3D: CT ouscanner3D  Tempo processo: 0,5h
2	Moldagem cerâmica: Moldagem cerâmica do molde de silicone; Corte e ajuste da matriz Tempo de processo: 1h	Modificar e projetar: Modelagem 3D; Dental CAD  Tempo de processo: 0,33h
3	Modelagem de cera: Adição de cera em incrementos derretidos; Esculpir o dente; Suavização  Tempo de processo: 2h	Etapa CNC: Instalar ferramentas e materiais (bloco WAX); Inicialização da máquina (zerar e verificar colisões); Usinagem; Remover blocos e cortar suportes; Suavização  Tempo de processo: 0,5h
4	Montagem de árvore: Fabricação de canais de alimentação; Colocação de respiradores; Posicionar a árvore na placa de molde	Montagem de árvore: Fabricação de canais de alimentação; Colocação de respiradores; Posicionar a árvore na placa de molde
5	Formação de molde: Montagem de formas de moldagem; Isolar forma de moldagem; Preparar gesso/material refratário; Despejo de gesso/material refratário na forma; Colocar molde em câmara de vácuo + plataforma vibratória Tempo de processo: 0,67 h	Formação de molde: Montagem de formas de moldagem; Isolar forma de moldagem; Preparar gesso/material refratário; Despejo de gesso/material refratário na forma; Colocar molde em câmara de vácuo + plataforma vibratória Tempo Processo: 0,67 h
6	Queima de cera: Colocar o molde no forno com programa automático com curva de temperatura Tempo de processo: 1,92 h	Queima de cera:  Colocar o molde no forno com programa automático com curva de temperatura Tempo de processo: 1,92 h
7	Prensagem a quente: Colocar pastilha de cerâmica/porcelana no molde; Colocar o pistão de zircônia no molde; Colocar o molde no forno de injeção com elevação controlada; Ligar forno com temperatura e deslocamento automáticos Tempo de processo: 1 h	Prensagem a quente: Colocar pastilha de cerâmica/porcelana no molde; Colocar o pistão de zircônia no molde; Colocar o molde no forno de injeção com elevação controlada; Ligar forno com temperatura e deslocamento automáticos Tempo de processo: 1 h
8	Jateamento de areia: Quebra/abertura de molde; Jateamento até que a prótese esteja completamente limpa e livre de material refratário Tempo de processo: 0,67 h	Jateamento de areia: Quebra/abertura de molde; Jateamento até que a prótese esteja completamente limpa e livre de material refratário Tempo de processo: 0,67 h
9	Finalização: Esmerilhamento; Depositar pasta glaze; Desenhar linhas do dente; Forno para vitrificação; Repetir o processo até finalizar Tempo de processo: 1 h	Finalização: Esmerilhamento; Depositar pasta glaze; Desenhar linhas do dente; Forno para vitrificação; Repetir o processo até finalizar Tempo de processo: 1 h
Tempo total de processo	9,33 h	6,67 h

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

O custo estimado é calculado na tentativa de simplificar, a partir da combinação de seus componentes primários dos métodos tradicional e CAD/CAM casting. Os componentes essenciais foram escolhidos e foram construídos modelos de estimativa de custos para esses componentes. A Tab.4 lista as variáveis e suas respectivas definições que foram utilizadas nos modelos.

**Tabela 4.** Variáveis utilizadas nos modelos econômicos

$C_{CNC}$ = custo do equipamento CNC	
$C_{direto}$	= custo direto de fabricação (neste caso atribuído ao material e resíduo gerado)
$C_{equipamento}$	= custo de equipamento variando entre as opções de cada técnica
$C_{forno}$	= custo do forno de fundição usado no processo
$C_{hotpress}$	= custo do forno 'hotpress'
$C_{máquina}$	= custo total de máquinas usadas no processo
$C_{máquinapeça}$	= custo de máquina por peça fabricada
$C_{material}$	= custo do material utilizado no processo
$C_{peça}$	= custo total de fabricação da peça (coroa, pontes 2x2 e 3x2)
$C_{produção}$	= custo de produção que engloba custos de mão-de-obra, energia e manutenção.
$C_{prod\_anual}$	= custo de produção anual
$C_{refugo}$	= custo do resíduo gerado no processo, sendo uma porcentagem do material utilizado
$C_{trab}$	= custo de mão-de-obra
$C_{3Dscanner}$	= custo do scanner 3D
$L_{anual}$	= lucro anual
$M_{peça}$	= massa da peça em g
$N_{batelada}$	= número de peças fabricadas em uma batelada
$N_{diatrab}$	= número de dias trabalhados em um mês
$N_{equipamento}$	= número de equipamento que pode variar conforme a produção e a técnica utilizada
$N_{fabricação}$	= número de horas de trabalho manual por dia
$N_{jornada\_diária}$	= número de horas trabalhadas no processo por dia
$N_{máquina}$	= número de máquinas necessárias para realizar o trabalho conforme a produção diária
$N_{meses}$	= número de meses trabalhados em um ano
$N_{produção}$	= número de horas de trabalho de máquina por dia
$N_{tecn}$	= número de técnicos necessários para uma produção diária
$P_{anual}$	= produção anual
Payback	= retorno de capital
$P_{diária}$	= produção diária
$P_{diária+refugo}$	= produção diária considerando perdas de material
$R_{anual}$	= receita anual
ROI	= retorno sobre investimento
$t_{amortização}$	= tempo de amortização
$t_{cad}$	= tempo de utilização do software CAD
$t_{cera}$	= tempo gasto na etapa de cera perdida
$t_{CNC}$	= tempo total da batelada para a técnica CNC
$t_{finalização}$	= tempo gasto na maquiagem da peça final
$t_{gesso}$	= tempo gasto na confecção do molde de gesso
$t_{jateamento}$	= tempo gasto na jateamento da peça final
$t_{manual}$	= tempo utilizado em trabalho manual
$t_{máquina}$	= tempo utilizado pelas máquinas
$t_{molde}$	= tempo gasto na montagem de molde
$t_{processototal}$	= tempo total de processo
$t_{3Dscanner}$	= tempo de utilização do scanner 3D
$t_{silicone}$	= tempo gasto na confecção do molde de silicone
$t_{sinterização}$	= tempo gasto na sinterização da peça final

### 3.1. CAD/CAM casting:

O custo componente é a soma dos custos diretos e indiretos, excluindo despesas administrativas [15,16], sendo calculado usando a equação (1):

$$C_{peça} = C_{direto} + C_{produção} + C_{máquina} \quad (1)$$

O custo direto é atribuído ao material utilizado na confecção da peça, bem como aos eventuais resíduos gerados durante o processo, descritos nas equações (2) e (3):

$$C_{direto} = C_{material} + C_{refugo} \quad (2)$$

$$C_{material} = V_{peça} \cdot \rho_{peça} \cdot \frac{C_{peça}}{g} \cdot N_{batelada} \quad (3)$$

Em termos de massa, considerar:

$$C_{material} = M_{peça} \cdot \frac{C_{peça}}{g} \cdot N_{batelada} \quad (4)$$

Além disso, foi levada em consideração que o material residual é uma porcentagem do material da peça devido a defeitos, rotinas de limpeza e outros fatores:

$$C_{refugo} = \% \cdot C_{material} \quad (5)$$

Os custos indiretos incluem custos com mão de obra e máquinas, que são amortizados com base na quantidade de peças fabricadas. O custo da mão-de-obra é estimado utilizando o salário atual e as horas de trabalho mensais, e é igual aos custos indiretos neste caso, porque despesas adicionais, como custos de consumo de energia, têm uma contribuição modesta e os custos de manutenção não são incluídos devido à falta de informação específica.

$$C_{produção} = C_{trab} \quad (6)$$

$$C_{trab} = \frac{N_{máquina} \cdot C_{trab} \cdot N_{jornada\_diária}}{P_{diária}} \quad (7)$$

Onde  $P_{diária}$  varia de 1 a 100 peças por dia.

O custo da máquina foi determinado por cotações e é o custo total de todas as máquinas necessárias no processo, amortizado pela quantidade de peças fabricadas em um período de retorno de 2 anos:

$$C_{máquina} = C_{CNC} + C_{3Dscanner} + C_{forno} + C_{hotpress} \quad (8)$$

$$C_{máquina} = \frac{\sum C_{equipamento} \cdot N_{equipamento}}{N_{diastrab} \cdot t_{amortização} \cdot N_{meses}} \quad (9)$$

depois disso, calculando o custo por peça:

$$C_{máquinapeça} = \frac{C_{máquina}}{P_{diária}} \quad (10)$$

Além disso, o tempo total da batelada pode ser determinado como a soma de todo o tempo gasto em cada etapa do processo, descrito na eq. (11):

$$t_{processototal} = t_{3Dscanner} + t_{CAD} + t_{CNC} + t_{molde} + t_{cera} + t_{sinterização} + t_{jateamento} + t_{finalização} \quad (11)$$

O  $t_{\text{manual}}$  e  $t_{\text{máquina}}$  contribui para o cálculo do número de técnicos e máquinas necessários à medida que a produção aumenta:

$$N_{\text{tecn}} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left( \frac{t_{\text{manual}} \cdot P_{\text{diário+refugo}}}{N_{\text{fabricação}}} \right) \quad (12)$$

$$N_{\text{máquinas}} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left( \frac{t_{\text{máquina}} \cdot P_{\text{diário+refugo}}}{N_{\text{produção}}} \right) \quad (13)$$

E então  $P_{\text{diário+refugo}}$  é calculado:

$$P_{\text{diário+refugo}} = \text{arredond}_{\text{cima}} (P_{\text{diária}} \cdot (1 + \% \text{refugo})) \quad (14)$$

Vale ressaltar que a jornada de mão de obra, neste caso, é considerada igual à jornada de máquina, pois um técnico pode operar diversas peças ao mesmo tempo.

### 3.2. Método tradicional (cera perdida):

Para a técnica tradicional, podem ser utilizadas as mesmas considerações de custos diretos e indiretos utilizadas nas técnicas CAD/CAM, observadas na eq. (15) a (18):

$$C_{\text{peça}} = C_{\text{direto}} + C_{\text{produção}} + C_{\text{máquina}} \quad (15)$$

$$C_{\text{direto}} = C_{\text{material}} + C_{\text{refugo}} \quad (16)$$

$$C_{\text{material}} = V_{\text{peça}} \cdot \rho_{\text{peça}} \cdot \frac{C_{\text{peça}}}{g} \cdot N_{\text{batelada}} \quad (17)$$

$$C_{\text{material}} = M_{\text{peça}} \cdot \frac{C_{\text{peça}}}{g} \cdot N_{\text{batelada}} \quad (18)$$

É claro que a quantidade de resíduos produzidos varia de acordo com as diferentes tecnologias, mas a ideia permanece a mesma:

$$C_{\text{refugo}} = \% \cdot C_{\text{material}} \quad (19)$$

O custo indireto é equivalente ao custo da mão de obra, excluindo o baixo custo de energia e custo de manutenção:

$$C_{\text{produção}} = C_{\text{trab}} \quad (20)$$

$$C_{\text{trab}} = \frac{N_{\text{máquina}} \cdot C_{\text{trab}} \cdot N_{\text{jornada\_diária}}}{h \cdot P_{\text{diária}}} \quad (21)$$

O custo de máquina também foi determinado por cotações, e compreende o custo total de todas as máquinas necessárias neste processo, utilizando forno e hotpress (eq. 23):

$$C_{\text{máquina}} = C_{\text{forno}} + C_{\text{hotpress}} \quad (22)$$

$$C_{\text{máquina}} = \frac{\sum C_{\text{equipamento}} \cdot N_{\text{equipamento}}}{N_{\text{diastrab}} \cdot t_{\text{amortização}} \cdot N_{\text{meses}}} \quad (23)$$

$$C_{\text{máquinapeça}} = C_{\text{máquina}} / P_{\text{diária}} \quad (24)$$

O  $t_{\text{processo total}}$  é a soma de todo o tempo gasto em cada etapa deste processo, e o  $t_{\text{manual}}$  e  $t_{\text{máquina}}$  permite computar o número de técnicos e máquinas de acordo com o crescimento da demanda:

$$t_{\text{processototal}} = t_{\text{silicone}} + t_{\text{gesso}} + t_{\text{cera}} + t_{\text{molde}} + t_{\text{sinterização}} + t_{\text{jateamento}} + t_{\text{finalização}} \quad (25)$$

$$N_{\text{tecn}} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left( \frac{t_{\text{manual}} \cdot P_{\text{diário+refugo}}}{N_{\text{fabricação}}} \right) \quad (26)$$

$$N_{\text{máquinas}} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left( \frac{t_{\text{máquina}} \cdot P_{\text{diário+refugo}}}{N_{\text{produção}}} \right) \quad (27)$$

E a produção diária é calculada:

$$P_{\text{diário+refugo}} = \text{arredond}_{\text{cima}} (P_{\text{diária}} \cdot (1 + \% \text{refugo})) \quad (28)$$

### 3.3. Indicadores de produção:

O cálculo dos custos de produção suporta o estabelecimento de negócios estratégicos para aumentar a rentabilidade, pois permite determinar se os custos são excessivos ou adequados, bem como a previsão de perdas e ganhos futuros. Como resultado, vários parâmetros de produção devem ser calculados para adquirir informações críticas e depois comparar as duas metodologias discutidas neste artigo. As informações gerais úteis incluem a produção anual demonstrada na (eq.29), custos de produção (eq.30), receita anual (eq.31), lucro anual (eq.32), retorno de capital (eq.33) e retorno sobre o investimento (ROI) apresentado na equação (34). Todas essas informações importantes tornam viável a comparação dos dois processos:

Produção anual:

$$P_{\text{anual}} = P_{\text{diário}} \cdot N_{\text{diastrab}} \cdot N_{\text{meses}} \quad (29)$$

Custo de produção anual:

$$C_{\text{prod\_anual}} = C_{\text{peça}} \cdot P_{\text{anual}} \quad (30)$$

Receita anual:

$$R_{\text{anual}} = \text{Preço} \cdot P_{\text{anual}} \quad (31)$$

Lucro anual:

$$L_{\text{anual}} = (\text{Preço} - C_{\text{peça}}) \cdot P_{\text{anual}} \quad (32)$$

Retorno de capital:

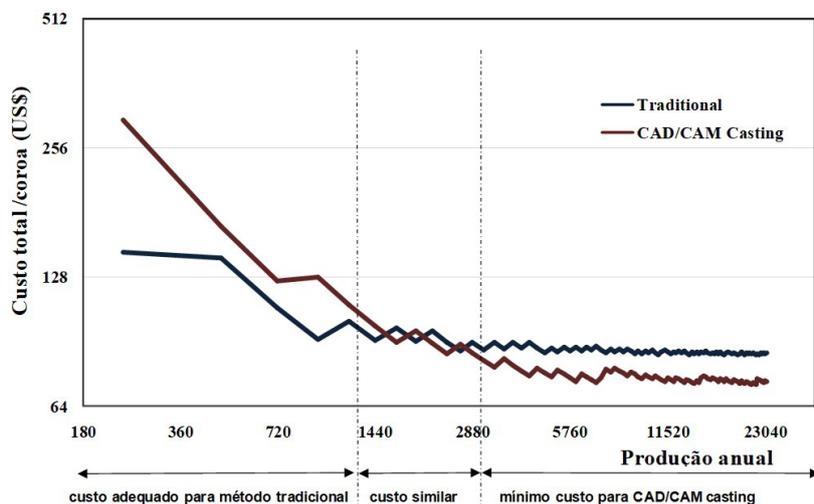
$$\text{Payback} = \frac{C_{\text{prod\_anual}}}{PL_{\text{anual}}} \quad (33)$$

Retorno sobre o investimento:

$$ROI = \frac{L_{\text{anual}}}{C_{\text{prod\_anual}}} \quad (34)$$

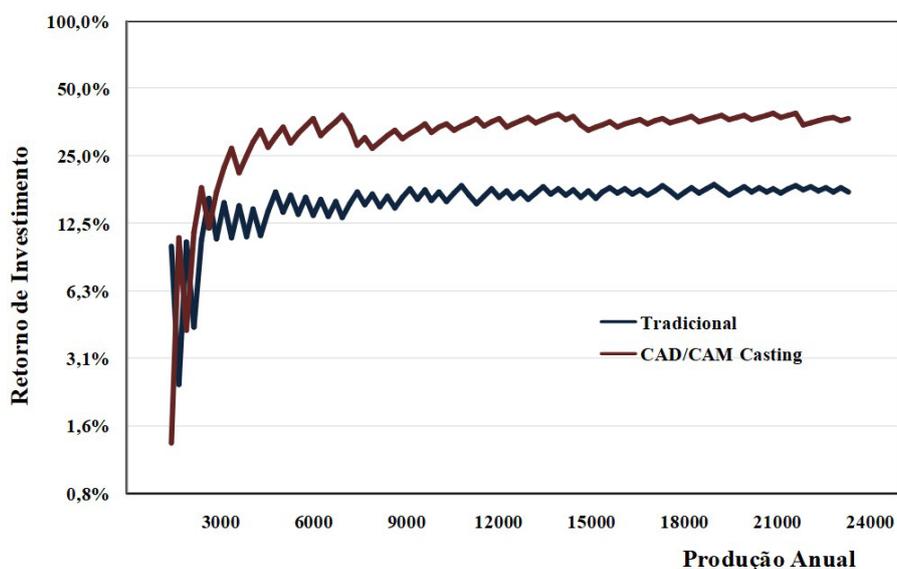
### 3.4. Resultados gráficos:

À medida que a demanda por coroas dentárias cresce, é possível demonstrar que o método tradicional é mais barato para baixa produtividade diária, enquanto o processo CAD/CAM casting é mais barato para alta produção. Existe uma faixa intermediária onde as duas técnicas possuem o mesmo custo, conforme mostrado na Fig.1, que compreende uma faixa de produção de 6 a 16 peças por dia. Além disso, o custo de produção diminui para ambas as técnicas, conforme ocorre aumento de produção, com tendência de estabilização na técnica tradicional.



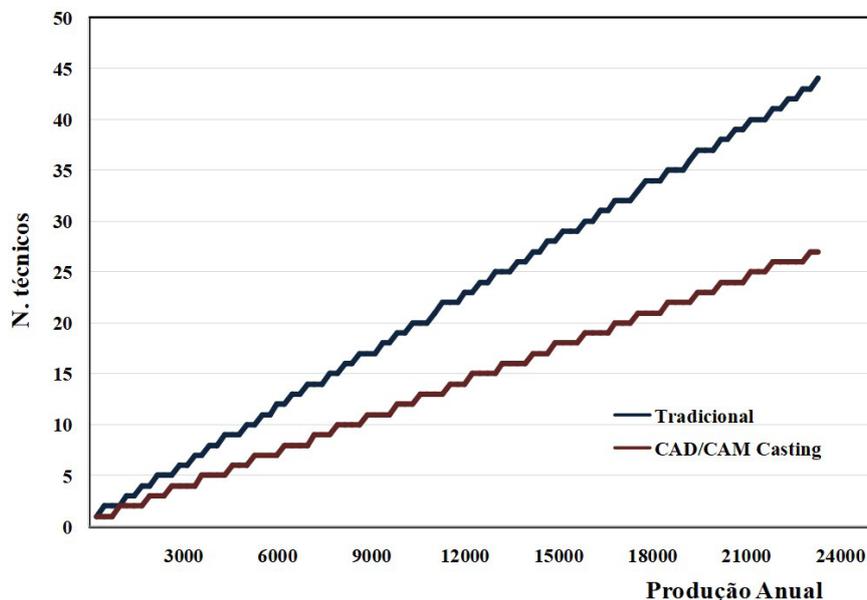
**Figura 1.** Custo total por peça versus capacidade de produção anual para ambas as técnicas

Uma margem de lucro maior pode ser alcançada se a empresa conseguir manter um custo de produção baixo e, para este caso, foi possível verificar que é necessário produzir pelo menos 2400 peças por ano, o que corresponde a 10 peças por dia em ambas as técnicas, para ser rentável e começar a ter retorno de capital. O tempo de retorno de investimento para o método tradicional é de aproximadamente 5 a 6 anos a partir de uma produção anual de 4.560 peças (19 peças por dia), enquanto para o método CAD/CAM é de 3 a 4 anos a partir de uma produção anual de aproximadamente 3.840 peças (16 peças por dia). Pode-se observar na Fig.2 que o retorno sobre o investimento da técnica tradicional é de cerca de 18%, enquanto que o ROI do CAD/CAM casting quase dobra à medida que a demanda cresce.



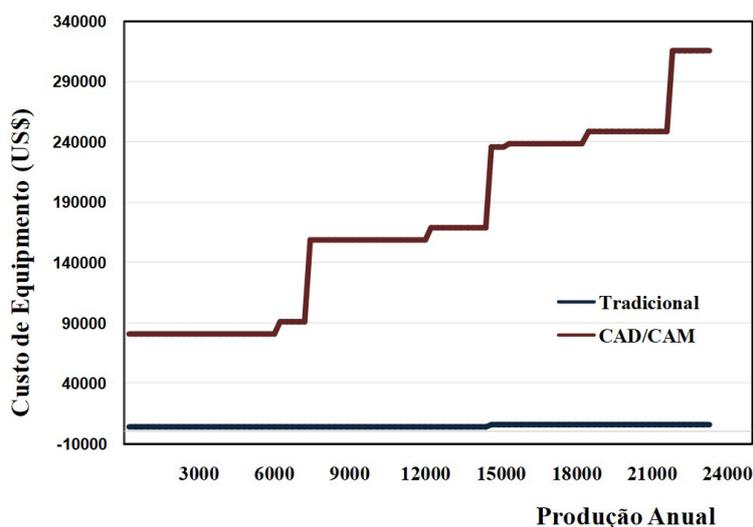
**Figura 2.** Tendência de ROI de acordo com a demanda para ambas as técnicas estudadas

A parte estritamente manual leva 5,38 horas para ser concluída no modo tradicional versus 3,47 horas no CAD/CAM casting, sugerindo que se a demanda crescer, mais técnicos seria necessário para fazer o mesmo número de próteses dentárias na técnica tradicional, conforme mostrado na Fig.3. Esta particularidade contribui significativamente para o custo final deste processo, sendo o principal custo em ambas as técnicas. O segundo maior custo está relacionado aos custos diretos de materiais, que são semelhantes e estáveis à medida que a demanda aumenta em ambos os métodos.



**Figura 3.** Número necessário de técnicos para cada método conforme crescimento de produção

O terceiro maior custo é o de máquina para o método CAD/CAM. Quando comparado ao método tradicional, observa-se que o custo de obtenção de equipamentos no método CAD/CAM casting aumenta drasticamente à medida que a demanda aumenta, conforme mostrado na Fig.4.



**Figura 4.** Custo de equipamento devido ao crescimento de produção para ambas as técnicas

#### 4. CONCLUSÕES:

Neste trabalho foram demonstrados modelos econômicos determinísticos ‘bottom-up’ para os processos CAD/CAM casting e tradicional (cera perdida). Esses modelos foram utilizados para calcular

parâmetros importantes para avaliação da produtividade e lucratividade de cada técnica. Apesar dos elevados custos de aquisição de equipamentos, o processo CAD/CAM casting proporcionou maior taxa de retorno sobre o investimento (ROI), com tempo de retorno médio de 3 a 4 anos quando comparado ao método tradicional, cujo tempo de retorno é de 5 a 6 anos. Pode-se verificar que o ROI do CAD/CAM é duas vezes maior que o ROI tradicional conforme o crescimento da demanda, mas também é possível verificar que o custo é bem interessante e adequado ao método tradicional quando a produção é baixa.

Como o método tradicional leva mais tempo do que CAD/CAM casting, foi possível prever a quantidade maior de trabalhadores, necessários para concluir as tarefas, à medida que a demanda de produção aumenta. Com isso, o custo de produção de peças na técnica tradicional aumenta, reduzindo sua lucratividade. O investimento em equipamentos odontológicos caros, por outro lado, não é tão necessário como na técnica CAD/CAM casting.

Os modelos econômicos obtidos destacaram as principais características das técnicas estudadas e revelaram alguns aspectos até então desconhecidos, como a faixa de produção de mesmo custo, e quais fatores têm maior impacto na sua rentabilidade. Esses modelos podem ser usados para simular outras condições, como aumento dos preços do laboratório ou da quantidade de material gasto. Pode-se usar a mesma abordagem para construir outros modelos econômicos e aplicá-los a outras tecnologias de fabricação de próteses dentárias, sejam elas já consagradas ou novas no mercado odontológico.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) por meio de bolsa de Projeto Nacional 350377/2022-7. Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio financeiro e à equipe da Zirclab Medical Devices pelo suporte e infraestrutura.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Asiedu Y, Gu P, 1998. Product life cycle cost analysis: State of the art review. *International Journal of Production Research* 36, 883-908.
- [2] Daschbach J M, Apgar H, 1988. Design analysis through techniques of parametric cost estimation. *Engineering Costs and Production Economics* 14, 87-93.
- [3] Sadr S M, Ahmadi E, Tabatabaei M H, Mohammadi S, Atri F, 2021. Comparison of internal fit of metal-ceramic crowns in CAD/CAM and lost-wax techniques in all fabrication stages through replica weighting, triple scanning, and scanning electron microscope. *Clinical and Experimental Dental Research* 8, 763-70.
- [4] Senthilkumar N, Arul N, Soundararajan K, 2018. A study on blended wax pattern in investment casting process. *International Journal of Creative Research Thoughts* 2, 281-298.
- [5] Rangarajan V, Padmanabhan T V, 2017. *Textbook of prosthodontics*. 2<sup>nd</sup> ed. New Delhi: Elsevier 3277.
- [6] Sarna-Boś K, Batyra A, Oleszek-Listopad J, Piórkowska-Skrabucha B, Borowicz J, Szymañska J, 2015. A comparison of the traditional casting method and the galvanofarming technique in gold alloy prosthetic restorations. *Current Issues in Pharmacy and Medical Sciences* 28, 196-9.
- [7] McCoy T, 2014. Lost wax casting technique for metal crown fabrication. *Journal of Veterinary Dentistry* 31, 126-32.
- [8] Diwan R, Talic Y, Omar N, Sadig W, 1997. Pattern waxes and inaccuracies in fixed and removable partial denture castings. *J Prosthet Dent* 77, 553-5.
- [9] Malament K A, Grossman D G, 1987. The cast glass-ceramic restoration. *J Prosthet Dent* 57, 674-83.
- [10] Kostevsek U, Brajlilh T, Balic J, Kadivnik Ž, Drstvensek I, 2018. Development of productivity estimation model for mass-customized production by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 24, 670-6.
- [11] Miyazaki T, Hotta Y, 2011. CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. *Australian Dental Journal* 56, 1, 97-106.
- [12] Trendowicz A, Jeffery R, 2014. *Software project effort estimation*. Springer International Publishing 483.
- [13] Niazi A, Dai J S, Balabani S, Seneviratne L, 2005. Product cost estimation: technique classification and methodology review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128, 563-75.
- [14] Bigot S, Nestler J, Dorrington P, Dimov S S, 2011. A costing methodology for products based on emerging micro and nano manufacturing technologies. *Micro and Nanosystems* 3, 254-62.
- [15] Cunico M W M, 2020. Feasibility study of digital manufacturing systems applied for medium scale production. *Global Journal of Computer Science and Technology* 20, 38-60.
- [16] Costabile G, Fera M, Fruggiero F, Lambiase A, Pham D, 2017. Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 8, 263-82.