

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

Lílian Cristina Côcco¹, Marlon Wesley Machado Cunico^{2*}

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

²R&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 2×2	1	200	5
Ponte 3×2	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_{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_{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

Étapas 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_{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_{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.

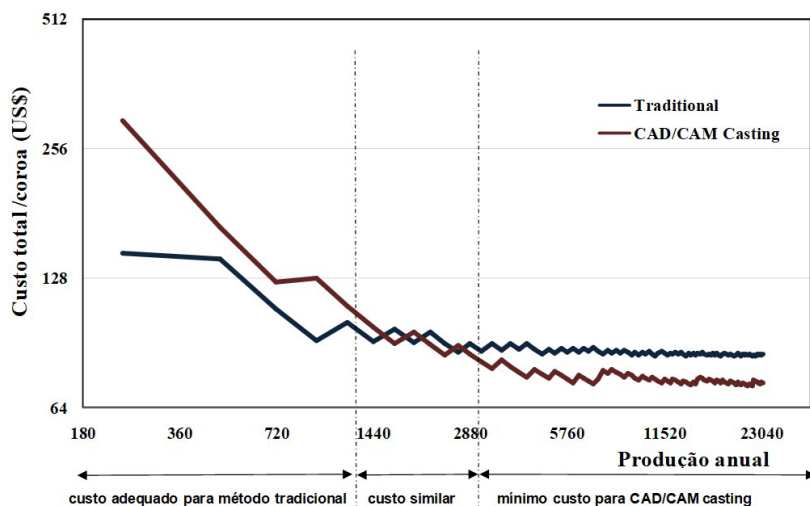


Figura 1. Custo total por peça versus capacidade de produção anual para ambas as técnicas

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.

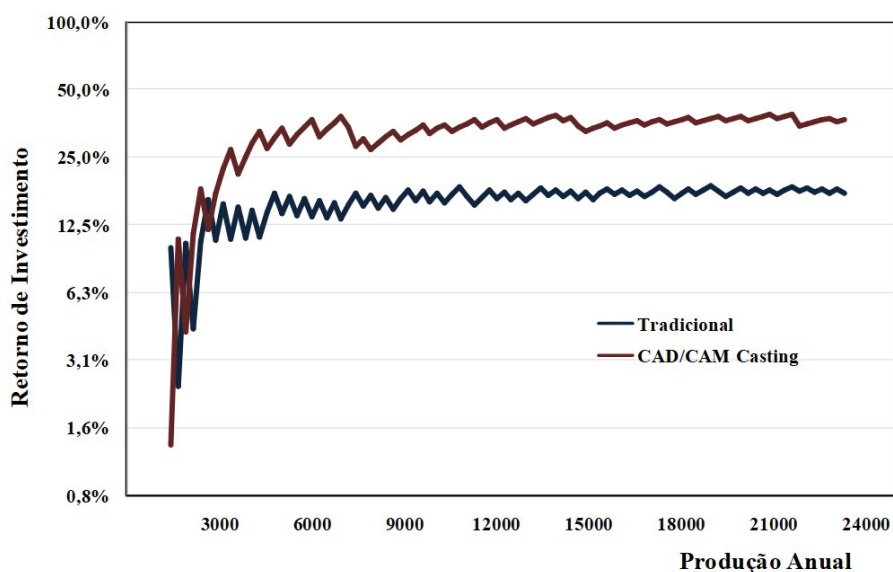


Figura 2. Tendência de ROI de acordo com a demanda para ambas as técnicas estudadas

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.

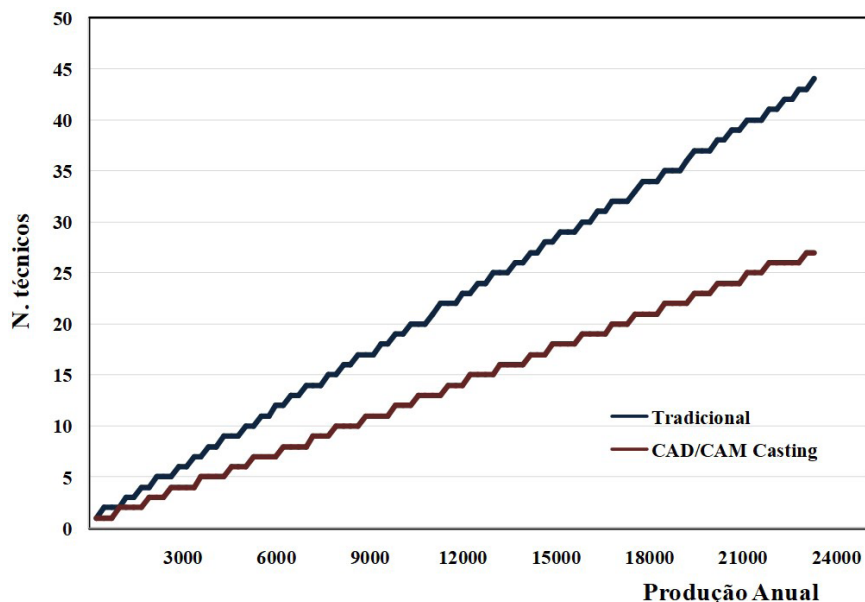


Figura 3. Número necessário de técnicos para cada método conforme crescimento de produção

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.

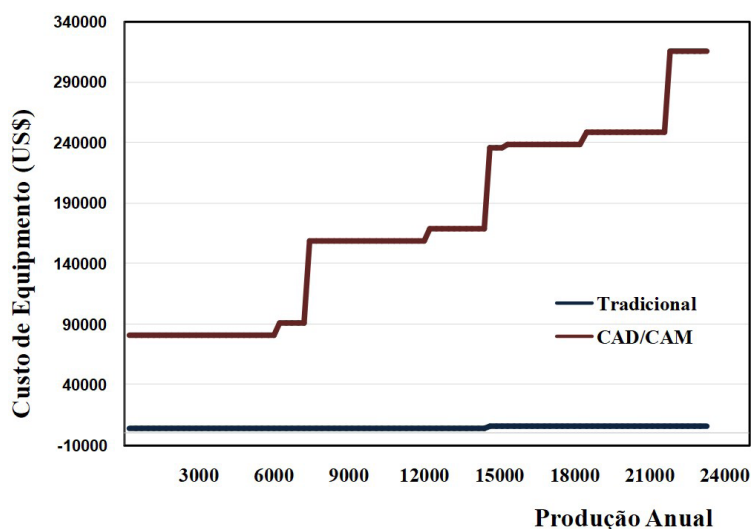


Figura 4. Custo de equipamento devido ao crescimento de produção para ambas as técnicas

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*. 2nd 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 galvanofforming 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.