

Estudo comparativo da manufatura de coroas dentárias de porcelana usando *hotpress*, CAD/CAM *casting* e *Shell Sintering Technology (SST)*

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

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

²Concept 3D, R Pedro Ivo 298 23, 80010-020, Curitiba, Paraná, Brazil

*marloncunico@yahoo.com.br; contato: +55 41 996 704 747

Resumo:

Este estudo analisou os custos e benefícios de três diferentes técnicas de manufatura dental: os tradicionais *hotpress* (prensado a quente), CAD/CAM *casting* (manufatura subtrativa) e a nova tecnologia denominada *Shell Sintering Technology (SST)*. Modelos econômicos determinísticos do tipo *bottom-up* foram utilizados para avaliar despesas e quantificar componentes indiretos após coleta de dados precisos. Os insumos utilizados para a construção dos modelos foram fixados principalmente em gastos com mão de obra, materiais e outros recursos necessários para a conclusão de cada etapa para produção de coroas de porcelana. Observou-se que o método SST tem os menores custos de material e mão de obra, e a técnica *hotpress* tem os menores custos de equipamentos, de acordo com os modelos econômicos. Por outro lado, o *hotpress*, tem os maiores custos de fabricação e é a tecnologia mais cara, com um retorno médio de investimento (ROI) de 17% em um período de 5,9 anos. Apesar dos custos significativos de aquisição de materiais e equipamentos, o processo CAD/CAM ficou em segundo lugar com um ROI de 35% e um período de retorno médio de 2,9 anos. Contudo, apesar dos valores econômicos apresentados serem adequados e esperados para estes processos, a tecnologia SST revelou valores extremamente vantajosos para o processamento de coroas dentárias em baixa e larga escala, alcançando mais de 180% de ROI com um período médio de retorno de investimento de 0,5 anos. De acordo com os dados obtidos, a nova tecnologia SST possui excelentes valores econômicos e tem potencial para impactar positivamente a indústria de fabricação de próteses dentárias, inovando em um setor extremamente tradicional.

Palavras-chaves: Coroa dentária; *hotpress*; CAD/CAM; prótese dental; modelo econômico; SST

1. INTRODUÇÃO

Em um ambiente moderno de manufatura, processos de produção eficazes e flexíveis são a base do sucesso diário dos negócios. Os compradores querem itens exclusivos, personalizados e de alta qualidade, mas não querem gastar muito dinheiro com eles. Além disso, as expectativas do cliente tornam-se mais personalizadas à medida que mais opções se tornam disponíveis. Neste contexto, a tecnologia de produção de manufatura aditiva (MA) pode oferecer uma solução para esses desafios [1], e é frequentemente usada na fabricação de diversos produtos, entre eles os odontológicos [2-6].

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma alternativa de fabricação subtrativa na etapa CAM do fluxo de trabalho digital odontológico, capaz de produzir dispositivos por camadas de materiais a partir de um arquivo de design gerado por computador, em linguagem padrão STL [7].

Seguindo a rápida evolução da manufatura aditiva de polímeros e metais, os avanços aplicados a materiais cerâmicos ganharam popularidade nos últimos anos [4, 7-9]. Embora a pesquisa em impressão 3D em cerâmica tenha começado na década de 1990, seu uso industrial ainda é limitado quando comparado a polímeros e metais, e sua adoção depende da disponibilidade de tecnologia [10].

A capacidade da manufatura aditiva de permitir a fabricação econômica de protótipos, produtos de baixo volume e até mesmo peças únicas personalizadas, sem a necessidade de ferramentas de molde especializadas e caras, é o primeiro benefício aparente imediato da indústria [11]. Alterar o design de um componente no contexto de MA é tão simples quanto atualizar os arquivos de design digital correspondentes, o que pode envolver uma alteração na orientação de construção e otimização dos parâmetros de processamento, mas não requer modificações físicas na máquina ou ferramentas personalizadas. Assim, o custo geral de produção das tecnologias MA é um tanto independente da complexidade do projeto [12] e está mais relacionado à utilização de material, ou seja, custo de materiais e tamanho de construção, consumo de energia de máquina, custo de mão de obra e número de peças a serem produzidas [13].

Além disso, a ausência de ferramentas sob medida se traduz não apenas em economia de custos, mas também em tempos de prototipagem e produção substancialmente mais curtos. Outra vantagem importante é a liberdade de design inerente fornecida pela formação de peças em camadas, que permite a fabricação de itens com grande complexidade geométrica que seria difícil, senão impossível de produzir, usando procedimentos de fabricação subtrativos ou formativos. Essa liberdade de projeto aprimorada fornecida pela manufatura aditiva também facilita a redução, ou mesmo a eliminação, de operações extras de conformação, corte e montagem, levando a prazos de entrega mais curtos e custos de fabricação mais baratos [13].

Dentre as várias técnicas de fabricação de MA disponíveis, este estudo foca na tecnologia de sinterização em casca ou *Shell Sintering Technology* (SST), que se fundamenta em utilizar um filamento fundido para criar um molde negativo, permitindo a fabricação de próteses dentárias. Aproveitando todos os benefícios da MA, o modelo econômico dessa nova técnica deve ser estudado, possibilitando a determinação de vários cenários e a aplicação de conceitos de modelagem econômica para compará-la aos métodos tradicionais.

Os dois métodos mais comuns usados por dentistas para fazer próteses dentárias são o CAD/CAM e o *hotpress*. Ambas as técnicas requerem uma compreensão completa dos materiais, ferramentas e operações manuais para produzir uma prótese de alta qualidade. A conhecida técnica de fundição por cera perdida ainda é utilizada como um padrão de comparação de referência para tecnologias de produção alternativas devido ao seu significado histórico.

Os custos dos produtos podem ser facilmente determinados, e as descobertas fornecerão aos tomadores de decisão do setor uma base útil para tomada de decisões, sobre investir ou não em uma determinada tecnologia. Isso representa um avanço significativo para um novo serviço.

A fim de determinar o impacto dos fatores de manufatura, como material, mão de obra e maquinário, este artigo investiga os componentes de fabricação de uma coroa dentária. Também fornece informações sobre cenários onde os fabricantes de próteses dentárias podem aumentar a produtividade, aproveitando essas tecnologias para acompanhar a demanda crescente. É plenamente possível que esta comparação de métodos tradicionais e SST evidenciem os benefícios de cada procedimento e ajude a todos os profissionais na tomada de decisões bem informadas para seus negócios, a fim de acomodar quaisquer mudanças antecipadas na demanda, para o setor odontológico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Princípios Técnicos

2.1.1. SST

Este é um método de ponta para a fabricação de próteses dentárias baseadas em compósito de vidro ($ZrSiO_4$) e é denominado *Shell Sintering Technology* (SST). Usando filamentos fundidos, produz um molde negativo de $ZrSiO_4$ colapsável de uma coroa ou ponte. É adequado para fazer moldes colapsáveis que podem suportar altas temperaturas e pode produzir itens com volumes consideráveis de material cerâmico e metálico [10, 14-19].

O pó cerâmico é usado para preencher a cavidade negativa do molde e depois é sinterizado. Após a peça ser aquecida para retirar a estrutura negativa (*debinding*), são produzidas coroas, pontes, *copings* e dentaduras por sinterização. Essa ideia tem se mostrado eficaz e abre uma nova oportunidade para a fabricação de materiais vitrocerâmicos usando técnicas de MA e um molde de cerâmica colapsável [20]. O esquema para este método é ilustrado na Fig.1.

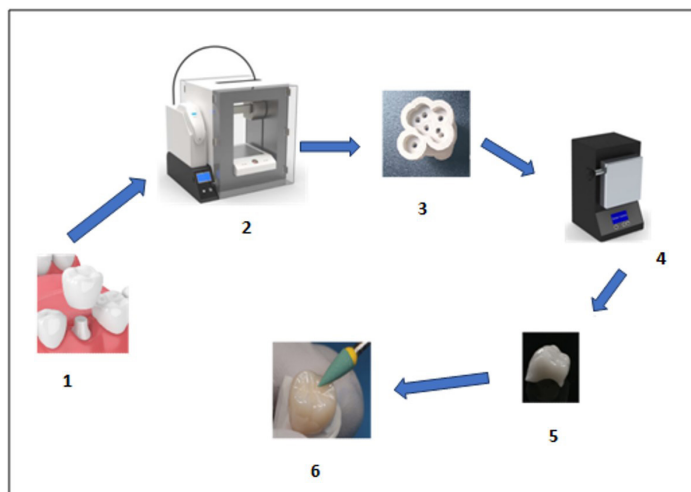


Figura 1. Esquema ilustrativo para a tecnologia SST onde: (1) desenho CAD e ajustes, (2) fabricação do molde negativo, (3) enchimento do molde com porcelana em pó, (4) sinterização, (5) coroa dentária sinterizada, (6) finalização com maquiagem, caso necessário.

2.1.2. Fundição tradicional (*hotpress*)

A fundição por cera perdida é o processo de criar um modelo em cera da restauração necessária e fundi-lo dentro de um material cerâmico resistente ao calor. A cera é usada para fazer os padrões porque pode ser moldada com precisão, trabalhada facilmente e aquecida para soltar-se completamente do molde [21,22].

O padrão de cera é forçado a queimar quando um forno de alta temperatura é usado para aquecer o padrão invertido, deixando um buraco que será então preenchido com o metal ou cerâmica fundida, utilizando um processo de prensagem à quente. Desenhos em cera dental de alta qualidade são criados manualmente, um procedimento demorado que requer o conhecimento de artesãos profissionais. Como a cera é brilhante, pode ser difícil detectar pequenos erros durante o processo de produção manual, quando o padrão de cera é removido da matriz, [23] causando alargamento do padrão.

A fabricação de coroas e próteses dentárias parciais fixas pela técnica de *hotpress*, utilizada na odontologia há mais de 40 anos, envolve a aplicação simultânea de pressão e calor em lingotes pré-fabricados em uma cavidade de molde previamente preenchida. A cerâmica pode ser feita como uma restauração monolítica ou prensada sobre um substrato, dependendo do uso pretendido e das preferências estéticas do paciente [24,25].

A técnica de *hotpress* será usada para se referir ao método convencional de criar manualmente o modelo de cera e, em seguida, usar o procedimento de prensagem a quente para preencher o molde, neste estudo.

2.1.3. CAD/CAM casting

A fabricação do padrão de cera é, na verdade, a etapa mais importante e trabalhosa na fabricação da coroa de porcelana fundida ao metal, coroa de cerâmica prensada e outras estruturas, mesmo que um novo método para produção automatizada de cera seja agora concebível. Ao usar tecnologias CAD/CAM alternativas, é possível criar padrões de cera feitos de materiais moldáveis e contornar vários limites da técnica convencional de enceramento. A utilização da tecnologia CAD/CAM apresenta uma série de vantagens, entre as quais a padronização da forma da restauração, a redução dos custos de produção, mão de obra e tempo [21], e a capacidade de fabricar restaurações de qualidade superior e consistente, utilizando blocos de cera que foram feitos profissionalmente.

O padrão de cera é produzido fresando um bloco de cera comercial usando a tecnologia CAD/CAM. Os procedimentos de revestimento e prensagem a quente são então concluídos da mesma forma que na fundição convencional.

O método de criar um modelo de cera usando a máquina e, em seguida, preencher o molde por prensagem a quente será referido como CAD/CAM *casting* neste estudo.

2.2. Desenvolvimento do Modelo Econômico

O custo da peça ($C_{peça}$) é a soma de custos diretos e indiretos^[1, 26] como indicado na equação 1, sendo examinados: custo direto (C_{direto}), custo de máquina ($C_{máquina}$), e custo de mão de obra (C_{trab}), excluindo-se custos administrativos de produção:

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

Outros modelos econômicos para vários tipos de próteses dentárias podem ser construídos usando parâmetros de produção. Neste estudo, buscam-se os dados de entrada para produzir uma coroa dentária de porcelana, entretanto, também pode ser usado para pontes, conforme mostrado na Tab.1. É importante ter em mente que uma ponte leva mais tempo para ser fabricada do que uma coroa, e o modelo econômico deve ser revisto para refletir isso.

Trabalhou-se com fornecedores de materiais e equipamentos para coletar informações sobre as etapas do processo e as necessidades da operação de produção comercial, e uma lista abrangente de insumos para cada uma das três técnicas é apresentada na Tab.2.

Tabela 1. Parâmetros de próteses

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

Nota: preço expresso em dólares (US\$).

Tabela 2. Parâmetros econômicos para todas as técnicas estudadas

Parâmetro	SST	Hotpress	CAD/CAM casting
Jornada diária (h)	14	14	14
C_{trab} (US\$/h)	12	12	12
Refugo (%)	5	15	10
Tempo amortização (anos)	2	2	2
Custo equipamento CNC/SST (US\$)	20000	-	67420
Custo forno fundição extra (US\$)	1200	2000	2000
Custo bancada 3D (US\$)	10000	-	10000
Custo forno hotpress (US\$)	-	2000	2000
N_{meses}	12	12	12
$N_{diatrab}$	20	20	20
$C_{peça/g}$	12,90	36,20	36,20
$M_{peça}$ (g)	0,5	0,5	0,5
$N_{batelada}$ (peças)	10	10	10
$N_{jornadatrab}$ (h)	8	8	8
$N_{fabricação}$ (h)	14	14	14
Preço (US\$)	100	100	100

Para comparação de custos e previsão de parâmetros indiretos, os modelos econômicos foram construídos usando todas as entradas mostradas nas Tab.1 e Tab.2.

2.2.1. Custo direto: Material

O custo direto está relacionado ao material usado para construir a peça e também qualquer descarte gerado durante o processo. Neste estudo, porcelana em pó foi usada para investigar a fabricação de coroa dentária por SST e pastilhas de porcelana para *hotpress* e CAD/CAM casting:

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

$$C_{\text{material}} = M_{\text{peça}} \cdot C_{\text{peça/g}} \quad (3)$$

$$C_{\text{refugo}} = \% \cdot C_{\text{material}} \quad (4)$$

Onde $M_{\text{peça}}$ é a massa utilizada na fabricação da peça, $C_{\text{peça/g}}$ é o custo por grama de material e C_{refugo} é o custo de material descartado no processo. Todos os valores estão demonstrados na Tab.2. É importante notar que a quantidade de resíduos produzidos e o custo do material por grama diferem com base na tecnologia considerada.

2.2.2. Custo indireto: Máquina

O custo de máquina foi calculado por meio de cotações e compreende o custo total de todas as máquinas utilizadas no processo, dividido pelo número de peças fabricadas em um período de retorno de dois anos. É importante mencionar que o número de máquinas varia de acordo com a tecnologia e é proporcional ao tempo gasto em cada etapa. Existe um arranjo de equipamentos fundamental para cada tecnologia. Por exemplo, o processo de prensagem a quente requer apenas dois equipamentos (um forno de fundição e outro forno de *hotpress*), mas o CAD/CAM requer quatro equipamentos: scanner 3D, CNC, forno de fundição e forno de *hotpress*.

$$C_{\text{máquinahotpress}} = C_{\text{fomofund}} + C_{\text{hotpress}} \quad (5)$$

$$C_{\text{máquinaCAD/CAM}} = C_{\text{CNC}} + C_{\text{3Dscanner}} + C_{\text{fomofund}} + C_{\text{hotpress}} \quad (6)$$

Por outro lado, a tecnologia SST necessita basicamente de três equipamentos (3D scanner, máquina SST e forno para fundição):

$$C_{\text{máquinaSST}} = C_{\text{SST}} + C_{\text{3Dscanner}} + C_{\text{fornofund}} \quad (7)$$

À medida que a demanda cresce, também aumenta a necessidade de equipamentos especializados devido às horas adicionais necessárias para a fabricação. Por isso, o modelo deve levar em consideração os custos dos novos equipamentos.

$$C_{\text{máquina}} = \frac{\sum C_{\text{equipamento}} \cdot N_{\text{equipamento}}}{N_{\text{diastab}} \cdot t_{\text{amortização}} \cdot N_{\text{meses}}} \quad (8)$$

Cada técnica leva uma quantidade diferente de tempo para completar uma etapa. Conhecer todas as etapas do processo é fundamental para calcular o custo de máquina por peça, pois permite determinar o tempo de máquina gasto em cada lote, e essa informação é apresentada na Tab.3.

Com esse conhecimento, também pode-se determinar quantas máquinas são necessárias para satisfazer uma demanda específica:

$$N_{\text{máquinas}} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left(\frac{t_{\text{máquina}} \cdot P_{\text{diário+refugo}}}{N_{\text{produção}}} \right) \quad (9)$$

onde $P_{diário+refugo}$ é calculado conforme a equação 10:

$$P_{diário+refugo} = \text{arredond}_{\text{cima}} (P_{diária} \cdot (1 + \%refugo)) \tag{10}$$

Finalmente, o custo de máquina por peça relacionado à produção diária pode ser calculado, onde $P_{diário}$ varia de 1 a 100 peças em base de produção diária:

$$C_{máquinapeça} = C_{máquina} / P_{diário} \tag{11}$$

2.2.3. Custo Indireto: Mão-de-obra

O custo de mão de obra é equivalente ao custo operacional neste estudo, pois foi excluído o custo não significativo de energia e também o custo de manutenção devido à falta de informações. É necessário, também, calcular o número de trabalhadores conforme a demanda aumenta:

$$C_{trab} = N_{tecn} \cdot C_{trab/h} \cdot N_{jornadatrab} / P_{diário} \tag{12}$$

onde $P_{diário}$ varia de 1 a 100 peças produzidas diariamente.

$$N_{tecn} = \text{arredond}_{\text{cima}} \left(\frac{t_{\text{manual}} \cdot P_{diário+refugo}}{N_{\text{fabricação}}} \right) \tag{13}$$

Tabela 3. Etapas e tempos de processo de todas as técnicas estudadas

Etapa	SST	Hotpress	CAD/CAM casting
1	Aquisição modelo 3D Tempo processo: 0,5h	Moldagem manual Tempo processo: 1h	Aquisição modelo 3D Tempo processo: 0,5h
2	Desenho e ajuste Tempo processo: 0,33h	Moldagem cerâmica Tempo processo: 1h	Desenho e ajuste Tempo processo: 0,33h
3	Fabricação Tempo processo: 0,5h	Modelagem cera Tempo processo: 2h	Etapa CNC Tempo processo: 0,5h
4	-x-	Montagem da árvore	Montagem da árvore
5	-x-	Formação de molde Tempo processo: 0,67h	Formação de molde Tempo processo: 0,67h
6	-x-	Cera perdida Tempo processo: 1,92 h	Cera perdida Tempo processo: 1,92 h
7	Sinterização Tempo processo: 6h	Prensagem à quente Tempo processo: 1h	Prensagem à quente Tempo processo: 1h
8	-x-	Jateamento de areia Tempo Processo: 0,67h	Jateamento de areia Tempo Processo: 0,67h
9	Maquiagem Tempo processo: 1,25h	Maquiagem Tempo processo: 1h	Maquiagem Tempo processo: 1h
Tempos de Processo e Equipamentos			
Tempo proc. total (h)	8,58	9,33	6,67
T_{manual} (h)	2,13	5,38	3,47
$T_{\text{máquinaSST}}$ (h)	0,48	-x-	-x-
$T_{\text{máquinaCNC}}$ (h)	-x-	-x-	0,42
$T_{\text{máq3Dscanner}}$ (h)	0,5	-x-	0,5
$T_{\text{máquinaforno}}$ (h)	6	1,92	1,92
$T_{\text{máquinahotpress}}$ (h)	-x-	1	1

2.2.4. Dados de fabricação

Para coletar dados importantes e comparar as três abordagens mencionadas neste estudo, várias métricas de produção devem ser calculadas. As informações gerais relevantes são mostradas nas equações 14 a 19 e compreendem fabricação anual, despesas gerais anuais, receita, lucro, tempo de retorno e retorno sobre o investimento (ROI). Com a ajuda de todos esses dados cruciais é possível avaliar e contrastar de forma justa as três técnicas.

$$\text{Fabricação anual: } F_{\text{anual}} = P_{\text{diário}} \cdot N_{\text{diastrab}} \cdot N_{\text{meses}} \quad (14)$$

$$\text{Despesas gerais anual: } C_{\text{fab anual}} = C_{\text{peça}} \cdot F_{\text{anual}} \quad (15)$$

$$\text{Receita anual: } R_{\text{anual}} = \text{Preço} \cdot F_{\text{anual}} \quad (16)$$

$$\text{Lucro anual: } L_{\text{anual}} = (\text{Preço} - C_{\text{peça}}) \cdot F_{\text{anual}} \quad (17)$$

Pode-se afirmar que só há retorno de investimento e tempo de retorno quando há lucro anual, calculado na equação 18:

$$\text{Payback} = \frac{C_{\text{fab anual}}}{L_{\text{anual}}} \quad (18)$$

Retorno de investimento (ROI):

$$\text{ROI} = \frac{L_{\text{anual}}}{C_{\text{fab anual}}} \quad (19)$$

3. RESULTADOS

3.1. Custo direto: Material

A Fig.2 mostra que o custo de material de uma peça associada ao processo SST é quase 67% menor do que o custo associado às outras duas técnicas. Isso se deve ao fato de que o SST pode usar pó de porcelana para fabricação de coroas, enquanto outros requerem bloco para prensagem a quente que são usualmente mais caros. As perdas operacionais de material do SST também são minimizadas, diminuindo os custos de material por peça.

3.2. Custo Indireto: Máquinas

À medida que a demanda aumenta, o custo do equipamento por peça fabricada diminui até o momento em que é necessária a compra de uma nova máquina, de acordo com a Fig.3. Conforme esperado, o *hotpress* oferece o menor custo devido à baixa demanda de uso e aquisição de equipamentos.

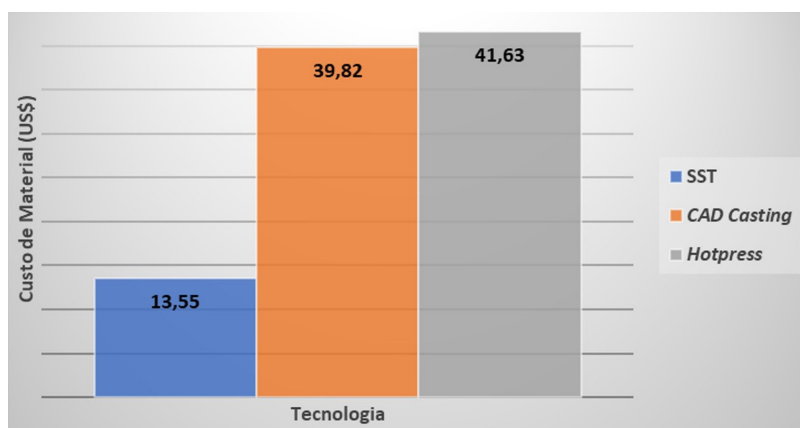


Figura 2. Custo de material por peça fabricada, de acordo com a tecnologia empregada

Em termos de custo de equipamento por peça produzida, o processo SST está na categoria intermediária e é 57% mais barato que o CAD/CAM, calculado a partir da média dos valores apresentados no pequeno gráfico dentro da Fig.3.

3.3. Custo Indireto: Mão de obra

A Fig.4 ilustra a crescente necessidade de especialistas à medida que a demanda cresce. Pode-se avaliar que o *hotpress* requer mais pessoal do que outras tecnologias. À medida que a fabricação aumenta, também aumenta o gasto mensal com salários, conforme a Fig.5, com um impacto significativo no custo final de fabricação das peças, apresentado na Fig.6. Neste exemplo, a tecnologia SST tem o menor custo, com 64% de queda no número de técnicos quando comparada ao processo *hotpress* e 43% quando comparada à técnica de CAD/CAM *casting*.

A Fig.6 mostra que os custos relativos de mão de obra para as três técnicas permanecem quase constantes quando a demanda aumenta. É possível supor que empregar o processo SST resultará em custos de mão de obra mais baixos para produzir coroas, aproximadamente 62% mais barato do que usar o método *hotpress* e 40% mais barato do que usar o CAD/CAM *casting*.

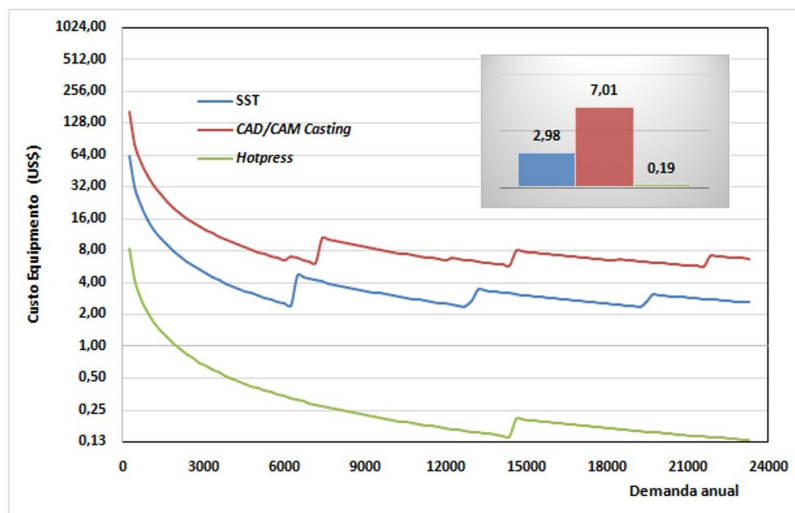


Figura 3. Custo de equipamento por peça fabricada conforme ocorre aumento de demanda

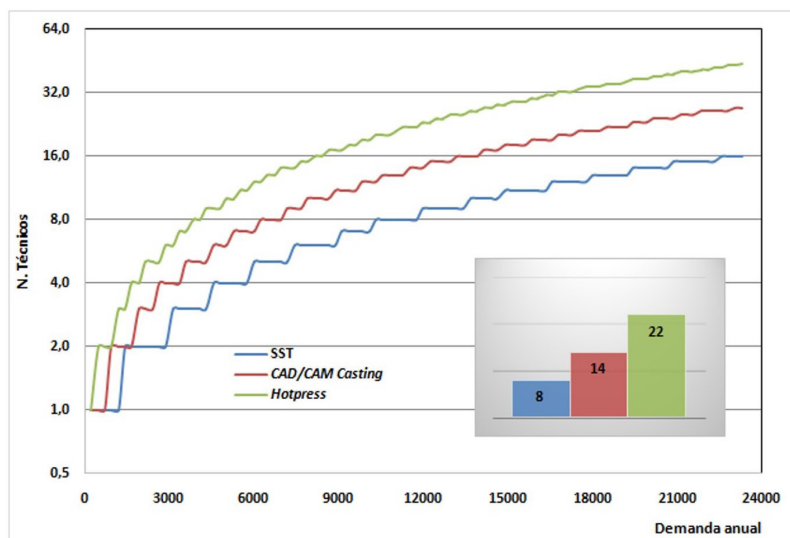


Figura 4. Número de trabalhadores necessários para cada técnica em uma simulação de demanda crescente

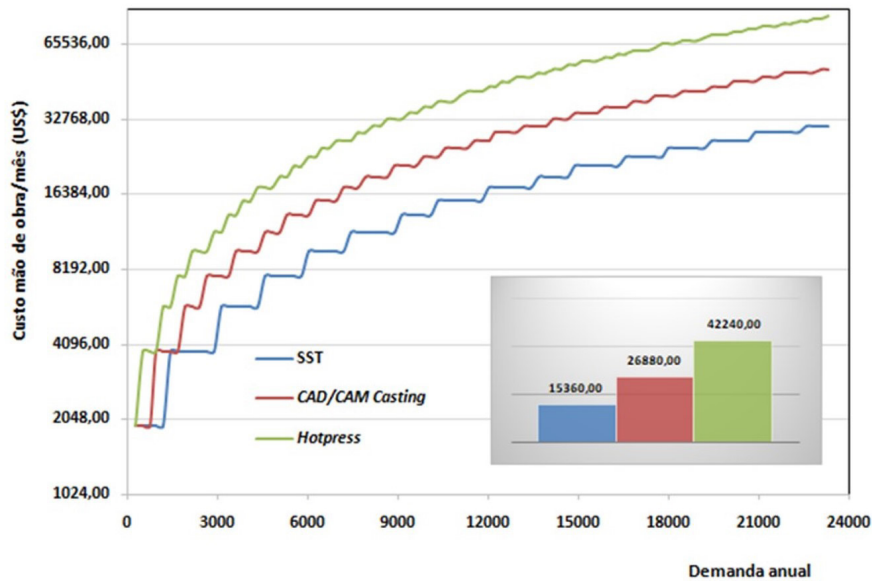


Figura 5. Custo de mão de obra por mês com simulação de demanda crescente

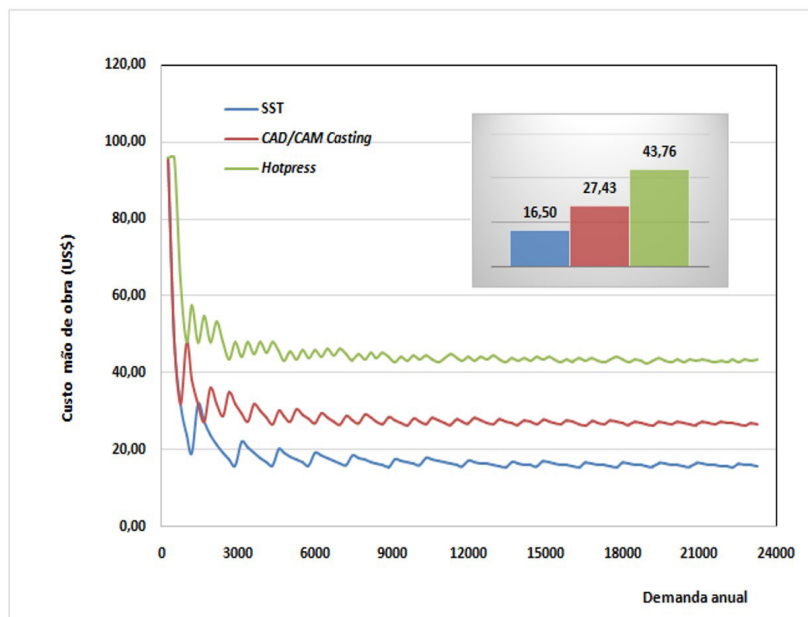


Figura 6. Custo de mão de obra por peça fabricada conforme aumento de demanda

Na Fig.7 são comparadas as técnicas em termos de todos os gastos envolvidos, e pode-se observar que o processo SST tem o menor custo de material e mão de obra, enquanto o *hotpress* tem o menor custo de equipamento.

Despesas de mão de obra, material e equipamento contribuem para um baixo custo total da tecnologia SST, conforme mostrado na Fig.8, com média de US\$ 35,00 após o aumento da demanda em 12 coroas por dia.

Como mostrado na Fig.9, o material tem um impacto considerável no processo de CAD/CAM casting, respondendo por cerca de 53,6% dos gastos, seguido pelo custo de mão de obra (36,9%) e equipamentos (próximo a 9,4%).

Em relação ao método *hotpress*, observa-se que o custo de mão de obra é de aproximadamente 51,1%, seguido do custo de material em 48,6%, e com um custo ínfimo de 0,2% associado ao equipamento, conforme mostrado na Fig.10.

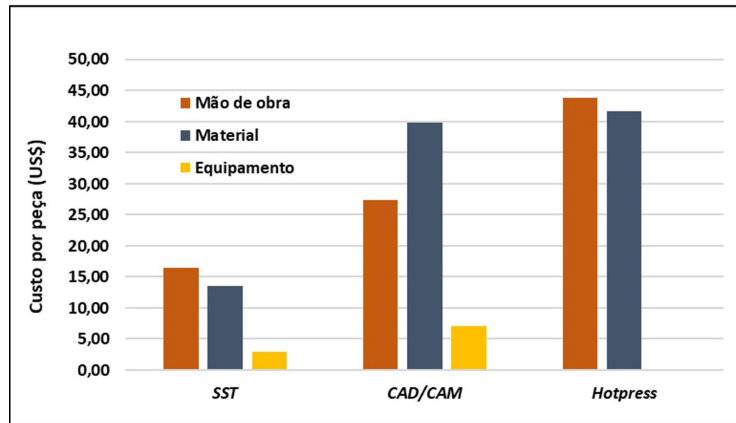


Figura 7. Comparação de custos das tecnologias sob estudo

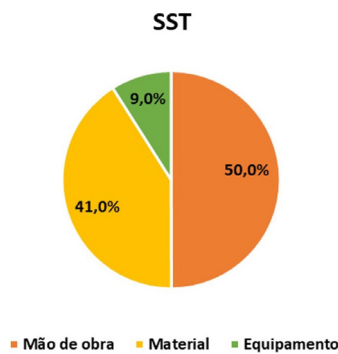


Figura 8. Resumo de custos da tecnologia SST

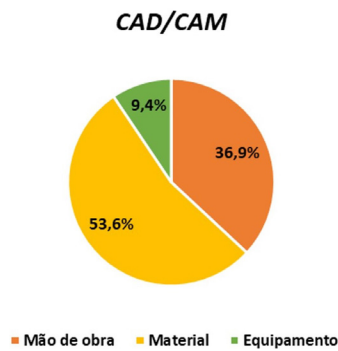


Figura 9. Resumo dos custos para a tecnologia CAD/CAM casting

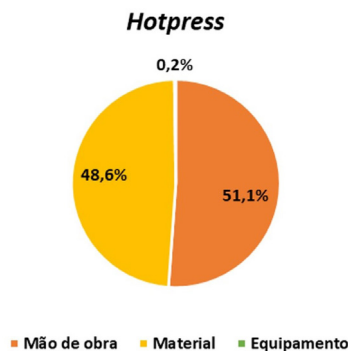


Figura 10. Resumo de custos da tecnologia hotpress

3.4. Dados de fabricação

O custo de fabricação de um produto pode ser determinado com base na demanda, somando todos os outros custos previamente determinados e usando a equação 1. Uma vez determinado o custo por peça, é possível calcular as outras variáveis cruciais para analisar o processo de manufatura. Analisando a Fig.11, pode-se concluir que o *hotpress* tem o maior custo para produzir uma coroa (considerando todos os custos de material, mão de obra e máquina), seguida do CAD/CAM, que tem um custo cerca de 13,0% menor, e então o SST, que tem o menor custo, inferior às outras duas abordagens em uma média de 61,0%. Outro ponto significativo a ser observado na Fig.11 é que o custo é razoável para os métodos SST e *hotpress* quando a produção é relativamente baixa.

Os custos anuais de fabricação são mostrados na Fig.12, onde os custos de manufatura são comparáveis, com uma diferença de 13,0% entre os processos de *hotpress* e CAD/CAM. O custo de fabricação de uma coroa no processo SST é reduzido em até 60,0% quando comparado ao processo mais demorado, que neste caso é o *hotpress*.

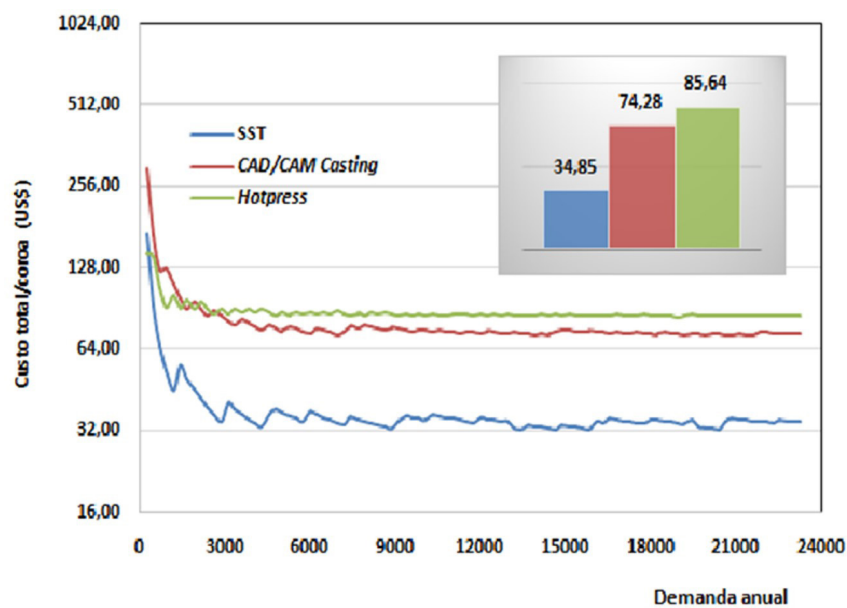


Figura 11. Custo total por coroa dentária de porcelana de acordo com o crescimento na produção

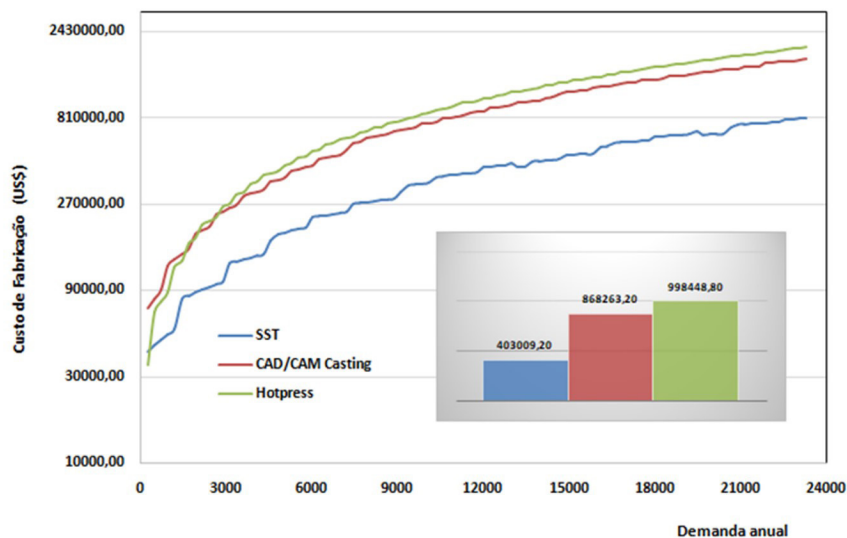


Figura 12. Custo total de fabricação de coroas dentárias em uma simulação de aumento de demanda

Quanto menor o custo de produção, maior o lucro obtido. Com isso, é inevitável que o processo SST gere mais receita do que as outras técnicas como mostra a Fig.13. Quando comparado ao CAD/CAM, o SST é 60,0% mais lucrativo, e quando comparado ao *hotpress*, é 78,0% mais rentável.

Espera-se que o método SST tenha um tempo de retorno mais curto do que outras tecnologias, devido aos seus valores de custos de fabricação mais baixos e maior lucratividade. Na verdade, conforme mostrado na Fig.14, o período de retorno médio para SST é de 0,5 anos, em comparação com 2,9 anos para CAD/CAM *casting* e 5,9 anos para *hotpress*.

Como principal resultado, pode-se observar que o investimento em tecnologia SST torna-se extremamente atraente. A Fig.15 mostra que a técnica de *hotpress* tem um ROI de cerca de 17,0%, enquanto a técnica de CAD/CAM *casting* tem um ROI cujo valor quase dobra com o aumento da demanda. No entanto, o ROI para a técnica SST é bastante expressivo, atingindo níveis de 187,0%. Isso sugere que a tecnologia SST, servindo como uma nova frente na fabricação de peças cerâmicas, pode melhorar toda a cadeia produtiva da prótese com baixo custo operacional e grande rentabilidade.

A Tab.4 é um resumo geral dos resultados do modelo econômico. É importante ter em mente que os dados não são uniformes, principalmente no início dos processos, onde não há valores, como no caso do tempo de retorno, ou possuem valores negativos, como no lucro anual e ROI. Neste cenário, avalia-se as medianas de cada caso, para estabelecer uma comparação de dados mais confiável.

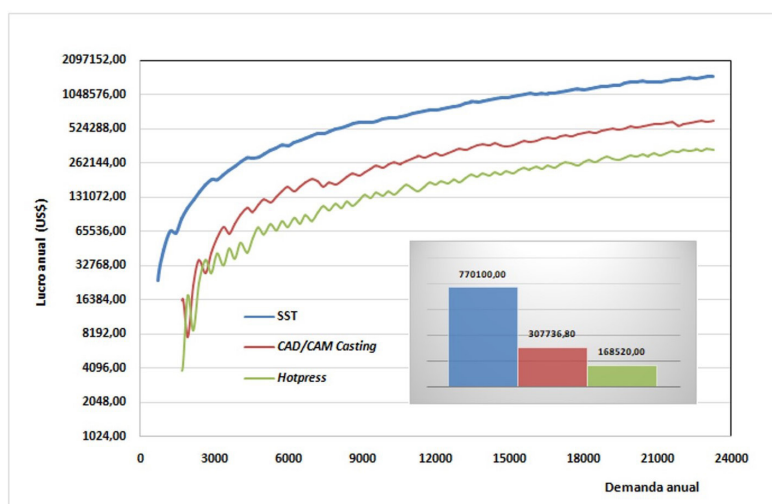


Figura 13. Lucro anual de acordo com o aumento de fabricação

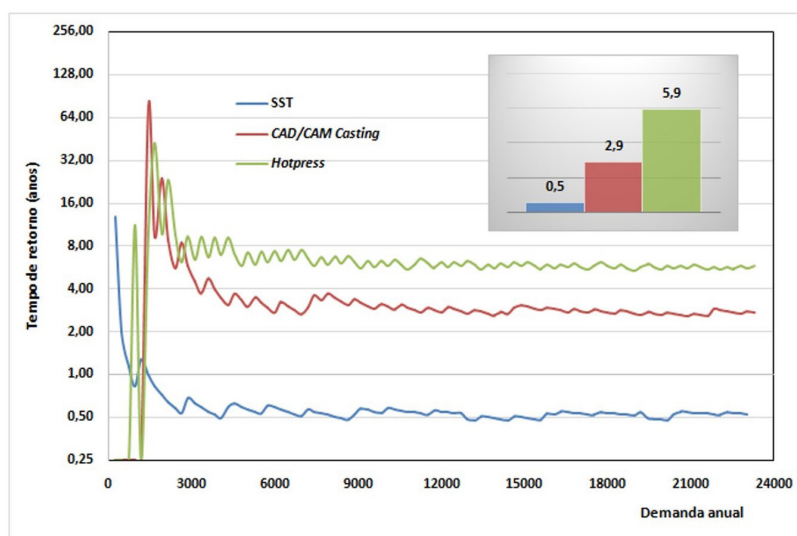


Figura 14. Tempo de retorno de investimento para as tecnologias estudadas

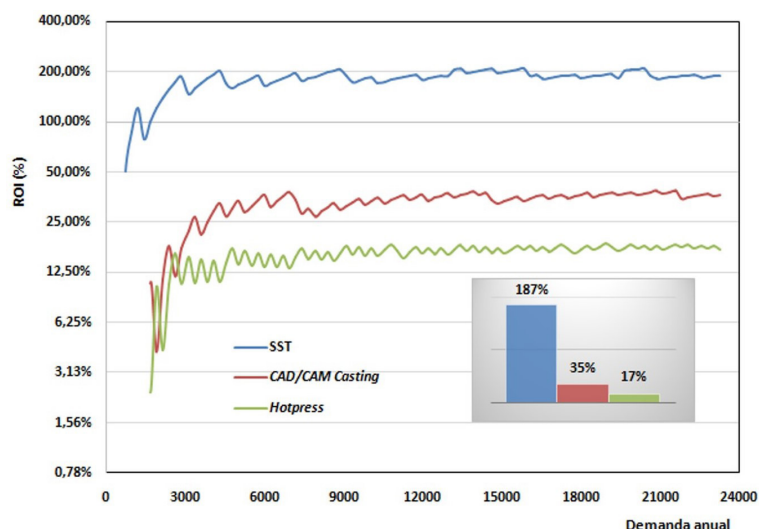


Figura 15. Retorno de investimento para as três técnicas de fabricação de próteses dentárias

Tabela 4. Resumo dos dados obtidos pelos modelos econômicos de todas as técnicas estudadas

Tecnologia	Custo Material*	Custo máquina*	Num. Técnicos	Custo mão de obra mensal*	Custo mão de obra*
SST	13,55	2,98	8	15360,00	16,50
CAD/CAM casting	39,82	7,01	14	26880,00	27,43
Hotpress	41,63	0,19	22	42240,00	43,76

Tecnologia	Custo total/peça*	Custo Produção*	Lucro anual*	Tempo de retorno (anos)	ROI (%)
SST	34,85	403009,20	770100,00	0,5	187
CAD/CAM casting	74,28	868263,20	307736,80	2,9	35
Hotpress	85,64	998448,80	168520,00	5,9	17

*valores em US\$

4. CONCLUSÃO

Modelos econômicos determinísticos *bottom-up* serviram como representação para processos de *hotpress*, *CAD/CAM casting* e *SST* nesta investigação. Os modelos foram usados para calcular fatores cruciais, para avaliar a produtividade e rentabilidade de cada técnica. Algumas publicações discutem a economia dos processos protéticos dentários, frequentemente com a ajuda de outros modelos econômicos e aplicações práticas [27, 28]. Uma série de trabalhos generalistas focam na manufatura aditiva [29-32] que é a base para aplicações em uma variedade de áreas. Como o primeiro a enfatizar os procedimentos primários de fabricação das próteses dentárias mais utilizadas, as informações oferecidas neste artigo constituem uma importante contribuição.

Os resultados mostraram que a técnica *SST* reduziu os custos de material e mão de obra para a fabricação de coroas dentárias, enquanto o custo de equipamento do método *hotpress* é menor em comparação com os outros dois métodos. Embora a técnica de *hotpress* tenha um baixo custo de equipamento, esse benefício foi diminuído devido ao maior tempo de processamento em comparação com as outras técnicas, portanto, os custos de mão de obra aumentam devido à maior demanda de mão de obra. O processo *hotpress* mostra os dois maiores custos de manufatura: mão de obra e material por peça. Como consequência, quando comparado ao *SST* e *CAD/CAM*, este processo apresenta o maior custo de fabricação. Ao comparar as três técnicas, o processo *CAD/CAM casting* ficou em segundo lugar devido aos custos de material e mão de obra.

Apesar dos elevados custos de aquisição de materiais e equipamentos, o processo de *CAD/CAM casting* proporcionou um ROI de 35,0%, com uma duração média de retorno de investimento de 2,9 anos, em comparação com o método *hotpress*, que teve um período de retorno de investimento de 5,9 anos e um ROI de 17,0%.

Embora esses valores sejam bastante aceitáveis em termos econômicos, a técnica SST mostrou valores extremamente vantajosos para o processamento de coroas dentárias em baixa e larga escalas, atingindo ROI acima de 180% com um tempo de retorno de investimento de 0,5 anos. Com um tempo de processamento intermediário, a nova tecnologia SST tem economia bastante favorável e tem potencial para transformar o mercado de manufatura de próteses dentárias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio financeiro e à equipe da Zirclab Medical Devices pela assistência e infraestrutura.

Este trabalho foi financiado parcialmente pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) sob número 350377/2022-7.

REFERÊNCIAS

- [1] COSTABILE G, FERA M, FRUGGIERO F, et al., 2017, Cost Models of Additive Manufacturing: A Literature Review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8: 263-282. Doi: 10.5267/j.ijec.2016.9.001
- [2] METHANI MM, REVILLA-LEÓN M, and ZANDINEJAD A, 2019, The Potential of Additive Manufacturing Technologies and Their Processing Parameters for the Fabrication of All-Ceramic Crowns: A Review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 32: Doi: 10.1111/jerd.12535
- [3] DAWOOD A, MARTI BM, SAURET-JACKSON V, et al., 2015, 3d Printing in Dentistry. *British Dental Journal*, 219: 521-529. Doi: 10.1038/sj.bdj.2015.914
- [4] GALANTE R, FIGUEIREDO-PINA CG, and SERRO AP, 2019, Additive Manufacturing of Ceramics for Dental Applications: A Review. *Dental Materials*, 35: 825-846. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.026>
- [5] SILVA LHD, LIMA E, MIRANDA RBP, et al., 2017, Dental Ceramics: A Review of New Materials and Processing Methods. *Braz Oral Res*, 31: Doi: <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2017>
- [6] ANADIOTI E, KANE B, and SOULAS E, 2018, Current and Emerging Applications of 3d Printing in Restorative Dentistry. *Current Oral Health Reports*, 5: 133-139. Doi: 10.1007/s40496-018-0181-3
- [7] KHANLAR LN, SALAZAR RIOS A, TAHMASEB A, et al., 2021, Additive Manufacturing of Zirconia Ceramic and Its Application in Clinical Dentistry: A Review. *Dent J (Basel)*, 9: 104. Doi: 10.3390/dj9090104
- [8] HADIAN A, FRICKE M, LIERSCH A, et al., 2022, Material Extrusion Additive Manufacturing of Zirconia Parts Using Powder Injection Molding Feedstock Compositions. *Additive Manufacturing*, 57: 102966. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102966>
- [9] GONZALEZ-GUTIERREZ J, CANO S, SCHUSCHNIGG S, et al., 2018, Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials*, 11: 840. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma11050840>
- [10] CAMARGO I, FORTULAN C, and COLORADO H, 2022, A Review on the Ceramic Additive Manufacturing Technologies and Availability of Equipment and Materials. *Ceramica*, 68: 329-347. Doi: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683873331>
- [11] CHUA CK, and LEONG KF, 2016, 3d Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications-of Rapid Prototyping, World Scientific Publishing Company.
- [12] TOFAIL S, KOUMOULOS EP, BANDYOPADHYAY A, et al., 2017, Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities. *Materials Today*, 21: Doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001
- [13] LAKHDAR Y, TUCK C, BINNER J, et al., 2021, Additive Manufacturing of Advanced Ceramic Materials. *Progress in Materials Science*, 116: 100736. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>
- [14] THOMPSON Y, GONZALEZ-GUTIERREZ J, KUKLA C, et al., 2019, Fused Filament Fabrication, Debinding and Sintering as a Low Cost Additive Manufacturing Method of 316L Stainless Steel. *Additive Manufacturing*, 30: 100861. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100861>
- [15] SA'UDE N, IBRAHIM M, and IBRAHIM MHI, 2014, Mechanical Properties of Highly Filled Iron-Abs Composites in Injection Molding for Fdm Wire Filament. *Materials Science Forum*, 773-774: 448-453. Doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.773-774.448
- [16] ABDULLAH AM, TUAN RAHIM TNA, MOHAMAD D, et al., 2017, Mechanical and Physical Properties of Highly ZrO₂/B-Tcp Filled Polyamide 12 Prepared Via Fused Deposition Modelling (Fdm) 3d Printer for Potential Craniofacial Reconstruction Application. *Materials Letters*, 189: 307-309. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.052>
- [17] NÖTZEL D, EICKHOFF R, and HANEMANN T, 2018, Fused Filament Fabrication of Small Ceramic Components. *Materials (Basel)*, 11: 1463. Doi: 10.3390/ma11081463
- [18] NÖTZEL D, EICKHOFF R, PFEIFER C, et al., 2021, Printing of Zirconia Parts Via Fused Filament Fabrication. *Materials*, 14: 5467. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma14195467>
- [19] LÜCHTENBORG J, BURKHARDT F, NOLD J, et al., 2021, Implementation of Fused Filament Fabrication in Dentistry. *Applied Sciences*, 11: 6444. Doi: <https://doi.org/10.3390/app11146444>
- [20] CUNICO MWM, 2020, Investigation of Ceramic Dental Prostheses Based on ZrSiO₄-Glass Composites Fabricated by Indirect Additive Manufacturing. *Int J Bioprint*, 7: Doi:
- [21] VOJDANI M, TORABI K, FARJOOD E, et al., 2013, Comparison the Marginal and Internal Fit of Metal Copings Cast from Wax Patterns Fabricated by Cad/Cam and Conventional Wax up Techniques. *J Dent*, 14: 118-129.

- [22]SIAS FR, 2005, Lost-Wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods, Woodsmere press.
- [23]FATHI HM, AL-MASOODY AH, EL-GHEZAWI N, et al., 2016, The Accuracy of Fit of Crowns Made from Wax Patterns Produced Conventionally (Hand Formed) and Via Cad/Cam Technology. *Eur J Prosthodont Restor Dent*, 24: 10-17.
- [24]ANSONG R, FLINN B, CHUNG KH, et al., 2013, Fracture Toughness of Heat-Pressed and Layered Ceramics. *J Prosthet Dent*, 109: 234-240. Doi: 10.1016/S0022-3913(13)60051-7
- [25]POROJAN L, SAVENCU C, and POROJAN S, 2016, Applications of Heat-Pressed Ceramics for Single Tooth Restorations. 67: 123-126.
- [26]CUNICO M, 2020, Feasibility Study of Digital Manufacturing Systems Applied for Medium Scale Production. 2020, *Global Journal of Computer Science and Technology: G Interdisciplinary Volume 20 Issue 5*.
- [27]LOSENICKÁ J, GAJDOŠ O, and KAMENSKÝ V, 2021, Cost-Utility Analysis of an Implant Treatment in Dentistry. *BMC Oral Health*, 21: 433. Doi: 10.1186/s12903-021-01790-y
- [28]SRINIVASAN M, SCHIMMEL M, NAHARRO M, et al., 2019, Cad/Cam Milled Removable Complete Dentures: Time and Cost Estimation Study. *J Dent*, 80: 75-79. Doi: 10.1016/j.jdent.2018.09.003
- [29]MAHADIK A, and MASEL D, 2018, Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (Amcet) Using Break-Down Approach. *Procedia Manufacturing*, 17: 70-77. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.014>
- [30]SCHRÖDER M, FALK B, and SCHMITT R, 2015, Evaluation of Cost Structures of Additive Manufacturing Processes Using a New Business Model. *Procedia CIRP*, 30: 311-316. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.144>
- [31]LAUREIJS RE, ROCA JB, NARRA SP, et al., 2017, Metal Additive Manufacturing: Cost Competitive Beyond Low Volumes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139: Doi: 10.1115/1.4035420
- [32]DING J, BAUMERS M, CLARK EA, et al., 2021, The Economics of Additive Manufacturing: Towards a General Cost Model Including Process Failure. *International Journal of Production Economics*, 237: 108087. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108087>