

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Estudo e projeto de um sistema para colagem automática e sua integração com robô

Ana Sofia Touguinha Machado



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador na FEUP: Eng^a Ana Rosanete Lourenço Reis

Co-orientador no INEGI: Eng^o Ricardo Lopes de Brito Seara Cardoso

Co-orientador na Zollern & Comandita: Eng^a Filipa Alexandra Martins Rocha

26 de Julho de 2019

Estudo e projeto de um sistema para colagem automática e sua integração com robô

Ana Sofia Touguinha Machado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

A *Zollern & Comandita Portugal* é uma empresa que se dedica à produção de peças de elevada precisão pelo método de fundição por cera perdida, para o setor automóvel, aeronáutico, energético, entre outros.

Por se tratarem de peças com elevadas exigências dimensionais, quaisquer hipóteses de defeitos deverão ser restringidas ao máximo para que as peças não sejam rejeitadas. Muitos destes defeitos são consequência do processo de colagem das peças em cera nos cachos, antes da formação da carapaça cerâmica. Esta colagem é feita manualmente sendo, por isso, fonte de problemas como pingos, excesso de cera cola e o espaçamento e orientação não uniforme das peças.

Assim, esta dissertação tem por objetivo o projeto de um equipamento que possibilite a automatização do processo de colagem dos modelos em cera no sistema de gitagem e alimentação, recorrendo a braços robóticos. Este sistema deverá garantir o correto espaçamento e orientação dos modelos, gerando uma junta de colagem resistente e de geometria perfeita. O sistema deverá também ser flexível de forma a adaptar-se e ser aplicável a diferentes geometrias quer dos modelos quer das gitagens.

O projeto foi dividido em três subprojetos essenciais, sendo o primeiro a investigação e desenvolvimento de um sistema de derretimento para a gitagem. O segundo subprojeto consiste no desenvolvimento de um conceito para a manipulação das peças a colar, tornando possível o seu posicionamento na gitagem. Por fim, com o terceiro subprojeto pretende-se idealizar um sistema de fixação para a gitagem.

No final, é apresentado um conceito idealizado para o *layout* deste sistema, sendo que cada conceito foi corretamente desenhado e dimensionado em CAD.

Abstract

Zollern & Comandita Portugal is a company which produces high precision parts by the lost wax casting method, for sectors such as automotive, aeronautic, energetic, among others.

Due to the high precision requirements of the parts, any chance of defects should be restricted so that the parts are not rejected. Most of these defects come as a consequence of the assembly of the wax parts in the sprue tree process, before the formation of the ceramic shell. This is done manually, being, therefore, a major source of defects such as drips, glue wax excess and non-uniform spacing and orientation of the wax models.

Thus, this dissertation aims at the design of an equipment that automatically assembles the wax models into the sprue tree, using robotic arms. This system must guarantee the correct spacing and orientation of the models, generating a strong welding joint with perfect geometry. Another important aspect is the need for a solution which is versatile and applicable for models and trees with different geometries.

The project was divided into three essential subprojects, the first being the research and definition of the sprue's wax melting process for the welding. The second subproject consists of the development of a concept for the manipulation and positioning of the parts to be welded. Finally, the third subproject concerns the design of positioning system for the wax tree.

In the end, a concept for the layout of this project will be presented. Every final concept should be correctly designed and dimensioned in CAD.

Agradecimentos

Começo por agradecer à professora Ana Reis, orientadora deste projeto na FEUP, pela oportunidade de realizar esta dissertação, pela troca de ideias e pela disponibilidade para esclarecimento de dúvidas.

À Eng^a Filipa Rocha, co-orientadora na Zollern & Comandita, agradeço a total disponibilidade, os conselhos e sugestões recorrentes, o acompanhamento incondicional ao longo do projeto, a amabilidade e amizade.

Agradeço também ao Eng^o Ricardo Cardoso, co-orientador do INEGI, pelo acompanhamento, pelos conhecimentos transmitidos e por toda a ajuda disponibilizada na elaboração dos desenhos e em tudo o que foi necessário.

A todos os elementos do INEGI e da Zollern pela disponibilidade e amabilidade com que me receberam.

Aos meus amigos agradeço o apoio e a companhia nas horas de trabalho e de lazer. Em particular ao Rui, por toda a paciência e ajuda na formatação deste trabalho.

Ao Gonçalo, um agradecimento especial pelo apoio, o carinho e por toda a ajuda.

Ao meu irmão agradeço toda a paciência, apoio e as palavras de incentivo.

Por último, o maior agradecimento dirige-se aos meus pais que me proporcionaram estes 5 anos. À minha mãe, por nunca me ter deixado desistir e me fazer ver o copo meio cheio. Ao meu pai por incentivar sempre a minha curiosidade e criatividade.

Sofia Touguinha Machado

Aos meus pais e irmão

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Introdução ao projeto	1
1.1.1	Apresentação do projeto	2
1.2	Enquadramento do caso de estudo	2
1.2.1	Objetivos do projeto	3
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Processo de fundição por cera perdida	5
2.2	Sequência de produção	6
2.3	Ceras	10
2.3.1	Tipos	11
2.3.2	Características	12
2.3.3	Cera plástica	14
2.3.4	Cera reciclada	14
2.3.5	Cera cola	15
2.4	Defeitos comuns nas peças em cera	15
2.4.1	Defeitos originários da injeção das ceras	16
2.4.2	Defeitos consequentes da colagem das peças no cacho	18
2.4.3	Junta ideal	21
2.5	<i>Benchmarking</i> : soluções existentes no mercado para equipamentos de colagem automática	21
2.5.1	<i>Modtech</i>	21
2.5.2	<i>MPI (20-14)- Automated Pattern assembly system</i>	24
2.5.3	<i>Vulcan Engineering Co.: Truglu wax assembly</i>	24
2.6	Sistema de colagem e derretimento da cera	26
2.6.1	Soldadura por barra quente com contacto	26
2.6.2	<i>Spin Welding</i>	26
2.6.3	Soldadura por ultrassons	27
2.6.4	Soldadura por Laser	28
2.6.5	Soldadura por laser Infravermelho	29
2.6.6	Soldadura por laser híbrido	30
2.6.7	Soldadura por frequências rádio (<i>Dielectric</i>)	30
2.6.8	<i>Hot gas welding/Aquaflame</i>	31
3	Enquadramento experimental	33
3.1	Peças seleccionadas	33
3.2	Colagem das peças na gitagem	33

3.3	<i>Layout</i> dos cachos	34
3.3.1	Análise da aplicabilidade das soluções existentes no mercado para o presente caso de estudo	36
4	Desenvolvimento de conceitos	37
4.1	Método de derretimento da cera da gitagem	37
4.1.1	Análise e seleção do conceito adequado	37
4.1.2	Conceito selecionado para a tecnologia de derretimento da cera	39
4.1.3	Teste do conceito selecionado	40
4.2	Sistema de manipulação das peças	47
4.2.1	Sistema de manipulação para as peças da série A	47
4.2.2	Análise e seleção do conceito adequado	49
4.2.3	Sistema de manipulação para as peças da série B	51
4.2.4	Análise e seleção do conceito adequado	53
4.3	Tabuleiros de disposição	54
4.3.1	Tabuleiro de disposição para a peça A	55
4.3.2	Tabuleiro de disposição para a peça B	56
4.3.3	Análise e seleção dos conceitos adequados	57
4.4	Sistema de fixação e rotação da gitagem	60
4.4.1	Conceitos para o sistema de fixação e rotação da gitagem	60
4.4.2	Análise e seleção do conceito adequado	68
5	Conclusões e trabalhos futuros	69
5.1	Trabalhos Futuros	71
	Referências	72

Lista de Figuras

1.1	Peças escolhidas para o projeto	3
2.1	Sequência de produção de peças por fundição por cera perdida	6
2.2	SGA e bacia	8
2.3	Gito da peça	8
2.4	Colagem das peças	8
2.5	Mergulho no revestimento cerâmico	9
2.6	Vazamento por gravidade	10
2.7	vazamento em vácuo	10
2.8	Bolha de ar	16
2.9	Abatimento	16
2.10	Rugosidade superficial	17
2.11	"Mal-cheio"	17
2.12	Pingos de cera	18
2.13	Junta com falta de cera cola	19
2.14	Pingos de cera cola	19
2.15	Junta mal selada	20
2.16	Junta bem selada	20
2.17	Espaçamento irregular	20
2.18	Exemplos de juntas	21
2.19	Disposição em gabari	22
2.20	Corte dos canais	22
2.21	Manuseamento dos modelos	22
2.22	fixação da gitagem	22
2.23	Colagem com barra quente	22
2.24	Resultado final	22
2.25	Pinça pneumática	23
2.26	Barra quente	23
2.27	Wax pattern assembly automation	23
2.28	Aproximação das peças	24
2.29	Barra quente derrete peças e gitagem	24
2.30	Aproximação das peças à gitagem	24
2.31	Mergulho em cera cola- lado esquerdo	25
2.32	Mergulho em cera cera cola- lado direito	25
2.33	Colagem das peças pelo sistema da <i>Vulcan</i>	25
2.34	Colagem das peças recorrendo a tocha de gás	25
2.35	Soldadura por <i>spin welding</i>	27
2.36	Soldadura por Ultrassons	28

2.37 Soldadura por laser	28
2.38 Comportamento dos diferentes emissores	29
2.39 Peça obtida por soldadura por laser híbrido	30
2.40 Esquematização do processo de soldadura por alta frequência	31
2.41 <i>Aquaflame systems</i>	31
3.1 Peça A	33
3.2 Peças B	33
3.3 Layout do cacho para a peça A	35
3.4 Layout do cacho para a peça B	35
3.5 Distância entre peças do tipo A	35
3.6 Distância entre peças do tipo B	35
4.1 Resistência cerâmica	39
4.2 Resistência de quartzo	39
4.3 Resistências de quartzo tungstênio e halogênio de onda média (cima) e onda curta (baixo)	39
4.4 Resistências em paralelo e refletor	40
4.5 Desenho do equipamento de testes de derretimento com as resistências escolhidas	41
4.6 Sistema de fixação do sistema de gitagem	41
4.7 Sistema de testes	42
4.8 Força aplicada nos teste de descolagem	43
4.9 Conceito MB1	48
4.10 Pinças "meia-lua"fechadas	48
4.11 Pinças "meia-lua"abertas	48
4.12 Conceito MB3	49
4.13 Vista em corte do conceito MB3	49
4.14 Protótipo do conceito MB2	50
4.15 Conceito MT1	51
4.16 Conceito MT2	52
4.17 Conceito MT3	52
4.18 Protótipo do conceito MT1	54
4.19 Conceito de tabuleiro para as peças da série A	55
4.20 Furo para canal de alimentação	55
4.21 Conceito TAB1	56
4.22 Conceito TAB2	57
4.23 Conceito TAB3	57
4.24 Protótipo do conceito para o tabuleiro de disposição para peças do tipo A	58
4.25 Protótipo TAB1	59
4.26 Protótipo TAB3	59
4.27 Sistema de aperto da bacia	60
4.28 Cachos presos ao disco	60
4.29 Sistema de aperto com manípulo	61
4.30 Primeiro fixador de ponta	62
4.31 Altura do primeiro fixador	62
4.32 Fixador de ponta FR1	62
4.33 SGA modificado	62
4.34 Reações dos rolamentos	63
4.35 Rolamentos selecionados	64

4.36	Dimensões da secção do SGA (esquerda) e diagrama de esforços (direita)	65
4.37	Conceito FR1	66
4.38	Vista em corte do conceito FR1	66
4.39	Ponteiras aquecidas	67
4.40	Fixador de bacia FR3	67
4.41	Conceito FR3	67
5.1	Proposta de conceito final	69

Lista de Tabelas

2.1	Composição das ceras padrão sem carga, utilizadas no processo de fundição por cera perdida	12
2.2	Critérios essenciais à seleção de ceras nas diferentes etapas do processo	13
2.3	Propriedades da cera plástica (Dados internos da ZCP)	14
2.4	Propriedades da cera reciclável (Dados internos da ZCP)	15
4.1	Matriz de decisão para o sistema de derretimento da cera	38
4.2	Resumo dos resultados obtidos no teste de colagem com resistências IV (sem cera cola)	43
4.3	Resultados dos testes de colagem e descolagem, recorrendo apenas às resistências IV	44
4.4	Resultados dos testes de colagem e descolagem, usando cera cola	46
4.5	Matriz de decisão para o sistema de manipulação das peças do tipo A	49
4.6	Matriz de decisão para o sistema de manipulação das peças do tipo B	53
4.7	Matriz de decisão para o tabuleiro de disposição das peças da série B	58
4.8	Matriz de decisão para o sistema de fixação e rotação do SGA	68

Abreviaturas e Símbolos

E	Módulo de <i>Young</i>
F_1	Força exercida pelo peso do cacho na gitagem
F_2	Força exercida pelos <i>grippers</i>
F	Força exercida na gitagem
F_a	Carga axial
F_r	Carga radial
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
I	Momento de Inércia
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
KAWA	Kale Automated Wax Assembly System
m_1	Massa do cacho da série A
M	Momento fletor atuante
MPI	<i>Mueller phipps international</i>
n	Fator de segurança
P	Carga dinâmica equivalente do rolamento
P_0	Carga estática equivalente do rolamento
SGA	Sistema de gitagem e alimentação
ZCP	Zollern & Comandita Portugal

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução ao projeto

O processo de fundição por cera perdida consiste na obtenção de peças utilizando uma moldação cerâmica. Este processo começa com a criação de um modelo de cera descartável, através da injeção de cera num molde metálico. Depois de obtidos os modelos em cera, estes são soldados a uma gitagem, formando uma estrutura conhecida por cacho. O passo seguinte consiste na aplicação de uma pasta cerâmica à volta do cacho, que, depois de solidificada, forma a moldação cerâmica. A estrutura em cera será perdida, quando o conjunto (moldação+cacho) é aquecido num forno, derretendo a cera. Assim que removida toda a cera, passa-se ao vazamento do metal na moldação, a qual será destruída para obtenção das peças. Finalmente, corta-se o gito às peças fundidas e efetuam-se acabamentos [1].

Devido à qualidade superficial e à capacidade de obtenção de peças com geometrias complexas e tolerâncias dimensionais apertadas, este processo é muitas vezes o único capaz de produzir determinados componentes. Assim, é de esperar que esta indústria esteja altamente interessada em corrigir aspetos que possam influenciar a qualidade das peças finais, procurando automatizar ao máximo os processos manuais. A automatização também traz consigo a diminuição dos tempos de ciclo e consequente aumento da produção.

Neste momento, um dos maiores problemas na produção de peças por *Investment Casting* encontra-se na preparação dos cachos em cera. A colagem dos modelos de cera nos cachos é um processo manual, no qual os colaboradores colam as peça, uma a uma, recorrendo a um ferro quente plano. Para além de demorado, este processo é fonte dos mais variados problemas, desde espaçamento incorreto entre as peças de um cacho, à colagem defeituosa das peças [2].

O projeto alvo desta dissertação consiste na projeção de um sistema semi-automático para a colagem dos modelos de cera na gitagem, de forma a aumentar o volume de produção e a qualidade do produto final, diminuindo erros que comprometam a integridade do processo.

1.1.1 Apresentação do projeto

Este projeto foi realizado no âmbito da dissertação realizada no 5º ano do mestrado integrado em engenharia mecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), numa parceria entre o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) e a empresa Zollern & Comandita (ZCP).

O INEGI, criado em 1986 e sediado nas instalações da FEUP, é um instituto de novas tecnologias que atua segundo 4 eixos fundamentais: investigação, inovação e transferência de tecnologia, consultoria científica e tecnológica, e prestação de serviços. A sua integração em projetos de outras empresas traz ao INEGI a possibilidade de trabalhar em áreas desafiadoras e adquirir conhecimentos tecnológicos que de outra forma seriam impossíveis.

O grupo alemão ZOLLERN é um dos pioneiros na indústria metalúrgica, tendo sido fundado em 1708 pelo príncipe Meinrad II. von Hohenzollern-Sigmaringen. Caracterizado pela busca constante pela inovação, o grupo foi crescendo até que, em 1991, foi construída e colocada em funcionamento a primeira unidade fora do país, em Portugal.

Atualmente, o grupo Zollern conta com 21 fábricas e filiais próprias na Europa, América e Ásia, estando representada em todas as regiões industrializadas do mundo. Os principais setores da empresa são indústria automóvel, indústria aeroespacial, indústria naval, máquinas de construção e construção mecânica.

A Zollern & Comandita Portugal (ZCP) é a empresa de fundição de precisão pelo processo de *Investment Casting* fundada pelo grupo alemão e situada na Maia. Nesta fundição vazam-se diversos aços ligados, superligas de níquel e ligas de cobalto-crómio, produzindo-se peças a partir de 1-2 gramas até 15kg, tanto de pequenas séries (5-10 peças por lote) como grandes séries (1.000-100.000 peças por lote).

A empresa portuguesa possui um setor de injeção de ceras e colagem de cachos, duas linhas de produção de revestimento cerâmico, um setor de fusão e vazamento atmosféricos e um de vácuo, inúmeras linhas de acabamento, uma unidade de tratamentos térmicos, um setor de manutenção e maquinagem, fabrico e reparação de moldes de injeção e de ferramentas de endireitamento e um centro de ensaios para controlo da qualidade.

1.2 Enquadramento do caso de estudo

De forma a cumprir com os requisitos, este sistema semi-automático para colagem deverá ter uma aplicabilidade alargada, sendo ideal para peças de dimensão média/reduzida, de grandes séries e tolerâncias dimensionais relativamente apertadas.

Assim, para o presente projeto, foram selecionadas duas peças, daqui em diante denominadas por "Modelo A" e "Modelo B", visíveis na figura 1.1. Estas peças fazem parte do turbocompressor dos automóveis, mais concretamente, da válvula de escape ou *wastegate*.

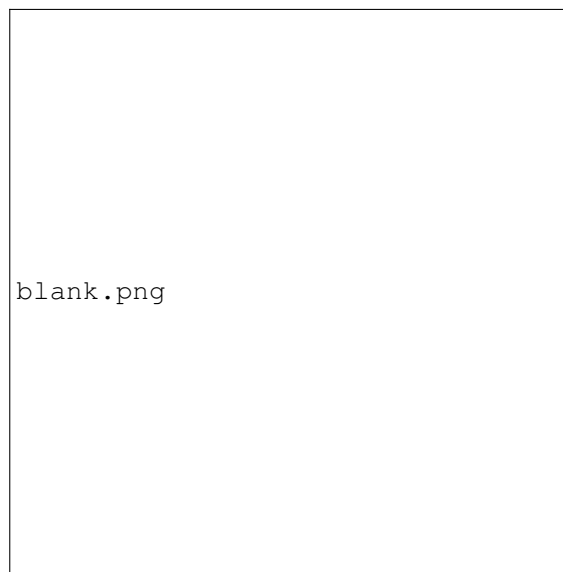


Figura 1.1: Peças escolhidas para o projeto

A função de um turbocompressor passa pela regulação do volume de ar que entra no motor. A válvula de escape tem como função regular do escape de gases e controlar a pressão de alimentação de ar para o motor, protegendo tanto o motor como o turbocompressor [3].

1.2.1 Objetivos do projeto

Dada a complexidade do projeto, e uma vez que o tempo de realização da dissertação é apenas um semestre, optou-se por definir três subprojetos essenciais, os quais se consideraram os mais importantes e o ponto de partida para a conceção deste sistema.

Assim, os objetivos passam por:

1. Definição e projeto para o derretimento da cera da gitagem
2. Definição e projeto para sistema de posicionamento e manipulação das peças a colar
3. Definição e projeto para sistema de fixação da gitagem

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação explora o processo de *Investment Casting*, concentrando-se na secção das ceras, em particular no processo de formação dos cachos. O tema desta dissertação foi brevemente descrito no capítulo 1.

No capítulo 2 começa-se por estudar as diferentes etapas deste processo, seguindo-se a análise dos tipos de ceras aplicadas e as suas propriedades. Serão também listados os diferentes defeitos a que as peças estão sujeitas durante a fase de injeção e de colagem dos modelos nos cachos,

testando-se a influência da aplicação de cera cola na qualidade da junta. Por fim, será feita uma recolha das tecnologias existentes nesta área, bem como dos métodos de derretimento de plástico.

O capítulo 3 introduz o enquadramento experimental: apresenta as duas peças selecionadas para o caso de estudo, explicando a forma como estas devem ser coladas (manualmente) na gita-gem e qual o *layout* que o cacho final deve assumir.

O capítulo 4 consiste no desenvolvimento de conceitos. Neste serão analisadas várias soluções para cada um dos subprojetos descritos em 1.2.1. No final as diferentes soluções serão avaliadas em vários parâmetros relevantes, numa escala numérica de valores compreendidos entre 0 (zero) e 5 (cinco), sob a forma de uma matriz de decisão, sendo que a solução final será a que obtiver maior pontuação. Para o caso do processo de derretimento de plástico serão ainda realizados ensaios de colagem para provar a aplicabilidade da solução selecionada. No final deste capítulo deverão ter-se todos os componentes necessários.

O capítulo 5 inclui uma figura do conceito idealizado para o produto final e expõe as principais conclusões e resultados obtidos. São apresentados aspetos que ficaram por explorar e que poderão ser fonte de melhoria no futuro, concluindo-se, assim, a dissertação.

A bibliografia, com todas as referências utilizadas no decorrer deste trabalho, apresenta-se no final deste documento.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No seguinte capítulo será realizada a revisão a bibliográfica, na qual serão explicados os diferentes conceitos necessários para a compreensão de todos os tópicos discutidos durante esta dissertação.

2.1 Processo de fundição por cera perdida

O processo de fundição por cera perdida, também conhecido por *investment casting*, é um dos processos mais antigos de fundição, tendo surgido por volta dos 5000 anos a.c. Devido ao bom acabamento superficial e à elevada precisão dimensional, este processo é ideal para a produção de componentes que apresentem formas relativamente complexas.

Esta técnica resume-se à injeção de uma cera derretida num molde metálico, obtendo-se uma reprodução da peça desejada. Depois da sua solidificação, um conjunto de peças em cera é agrupado numa "árvore" que será mais tarde mergulhada num banho cerâmico, que irá solidificar à volta da árvore de cera, formando uma carapaça. Prossegue-se com o aquecimento da carapaça, com o objetivo de derreter a cera, criando-se uma estrutura oca com a forma exata da peça pretendida. Uma vez removida toda a cera, sinteriza-se a moldação cerâmica e vaza-se o metal fundido. Depois de solidificado o metal, parte-se a moldação e removem-se os excessos, obtendo-se uma peça metálica que será posteriormente sujeita a processos de acabamento final [4].

2.2 Sequência de produção

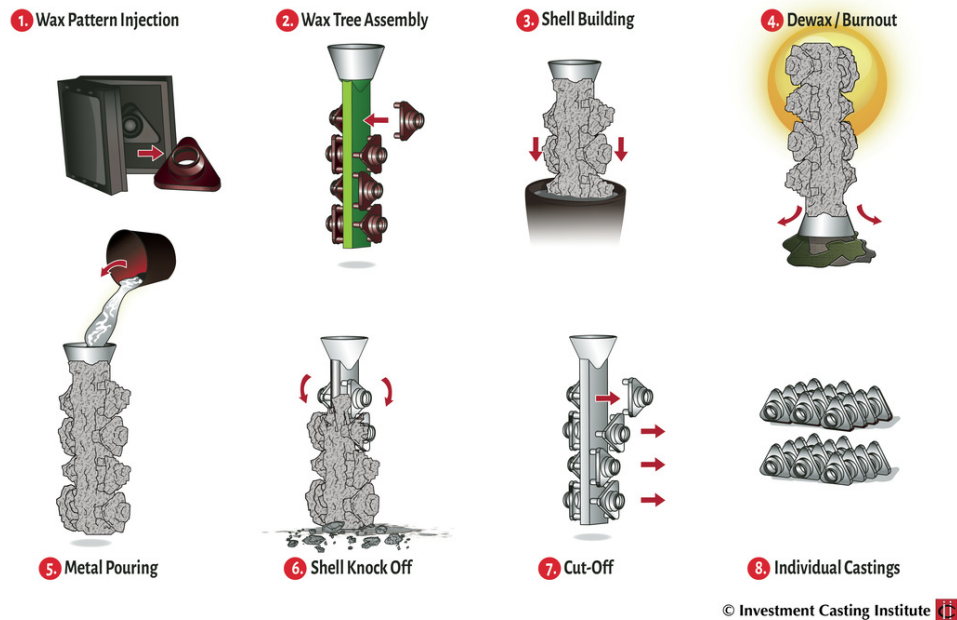


Figura 2.1: Sequência de produção de peças por fundição por cera perdida [5]

A figura 2.1 apresenta o conjunto de passos essenciais à obtenção de uma peça final de boa qualidade e livre de defeitos segundo o processo de fundição por cera perdida.

1. Injeção de cera no molde

No caso da ZCP, os moldes de injeção podem ser produzidos pelo próprio cliente, ou então podem ser produzidos internamente, por maquinagem ou eletroerosão de blocos de alumínio ou aço, caso as peças sejam encomendadas por clientes ibéricos. Quando se tratam de peças direcionadas ao mercado externo, os moldes são produzidos pela casa mãe, na Alemanha. Existe também a possibilidade de obter cavidades feitas à base de bismuto para peças que não possuem critérios apertados.

Em todo o caso, o modelo deverá ser uma réplica da peça final que se pretende obter, tendo, no entanto, em consideração compensações dimensionais provenientes das alterações volumétricas consequentes à solidificação tanto da cera como do próprio metal dentro da carapaça [4].

Através da injeção de cera, a temperatura e pressão relativamente baixas, no molde concebido na etapa antecedente e após a respetiva solidificação, obtêm-se os modelos a utilizar para formar a carapaça cerâmica [6].

No caso específico da ZCP, a produção de peças em cera tanto pode ser executada de forma manual como recorrendo a máquinas automáticas.

Após a solidificação da cera, os modelos são cuidadosamente retirados dos moldes e deixados à temperatura ambiente para arrefecerem. Trata-se de uma fase crítica ao processo geral, uma vez que, qualquer defeito que possa eventualmente existir no modelo de cera se vai refletir num erro da peça final, exigindo acabamentos posteriores ou tornando-se sucata, caso os defeitos sejam incorrigíveis.

2. Construção dos cachos em cera

Nesta etapa os vários modelos de cera vão ser acoplados a um sistema de gitagem e alimentação (SGA), formando um cacho ou árvore. Este sistema é formado por um conjunto de canais e elementos externos à peça fundida, por onde será vazado o metal para as cavidades de moldação (sistema de gitagem de enchimento), e que compensarão a contração do metal na peça (sistema de alimentação) [6].

De forma a obter peças livres de defeitos é essencial realizar um estudo minucioso do comportamento da liga metálica selecionada durante a solidificação, bem como do design da própria peça, de forma a projetar um SGA eficaz. Os fatores a ter em conta são [7]:

- Rápido enchimento da moldação
- Minimizar turbulência
- Evitar erosão dos machos e molde
- Remover as impurezas e inclusões
- Promover gradientes de temperaturas favoráveis
- Reduzir custos de produção
- Evitar distorção na cavidade de moldação
- Controlar condições de escoamento

Assim, começa-se por colar uma bacia no SGA, através da qual o metal será vazado. No caso das peças consideradas para este projeto não é necessário efetuar esta etapa de colagem da bacia, uma vez que o molde de obtenção do SGA está projetado de forma a injetar a cera diretamente na bacia. O resultado final será algo semelhante ao visível na figura 2.2.

De seguida o conjunto (com exceção da bacia) é mergulhado em cera parafina no estado líquido, à temperatura de 90°C, durante aproximadamente 3 segundos. Uma vez solidificada a cera parafina, procede-se à colagem dos modelos: esta colagem é feita pela fusão da zona de ataque/gito (ver figura 2.3) do modelo de cera ao SGA, recorrendo a uma espátula quente (*hot knife*) presente na figura 2.4 [8].



Figura 2.2: SGA e bacia

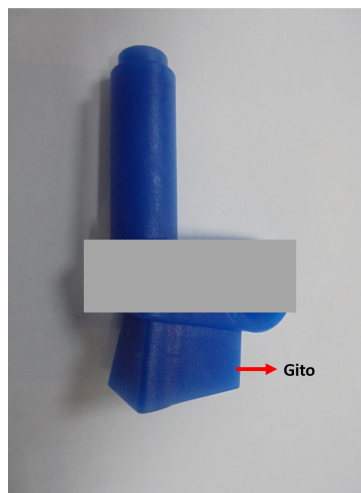


Figura 2.3: Gito da peça

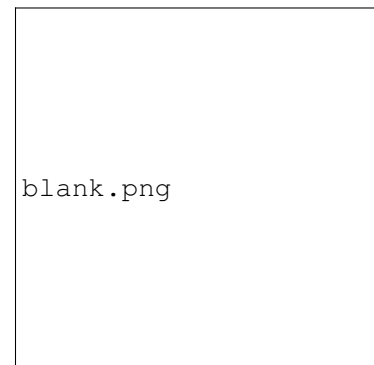


Figura 2.4: Colagem das peças

Na ZCP, antes de passarem para o próximo estágio, os cachos são mergulhados primeiro em desengordurante e depois em duas tinas de água, para que possam ser lavados [9].

3. Formação da carapaça cerâmica

Na ZCP, depois da lavagem, os cachos são pendurados pela bacia cerâmica num disco metálico. Informações relativas ao número de camadas que devem ser aplicadas e quais os banhos a utilizar, bem como o programa que se deve impor ao robô, encontram-se descritas na carta cerâmica. A imersão do cacho pode ser feita manualmente ou de forma automatizada, como na figura 2.5.

O revestimento cerâmico é formado através de sucessivos mergulhos do cacho na barbotina, que consiste numa farinha de pós refratários e ligantes. Os grãos cerâmicos da barbotina são finos, de forma a obter-se bom acabamento superficial nas peças.

Entre as sucessivas imersões do cacho na barbotina, este é pulverizado com partículas cerâmicas com diferentes tamanhos de grão.

Entre os mergulhos o cacho é deixado secar durante intervalos de tempo definidos (normalmente de 2,5 a 5 horas), em condições de temperatura e humidade bem definidas.

Esta etapa é de elevada importância sendo que a secagem das primeiras camadas (especialmente da primeira) não pode ser excessivamente rápida, uma vez que as tensões criadas durante a remoção da água fazem com que a camada cerâmica fissure. A partir da terceira ou quarta camada este problema já não existe pelo que há interesse em secar as camadas o mais rapidamente possível.

Após a última camada, os cachos são deixados a secar durante cerca de 48 horas.



Figura 2.5: Mergulho no revestimento cerâmico [10]

4. Descerificação e pré-queima

A descerificação consiste na remoção da cera do interior da cavidade cerâmica, sendo obtida por meio de aquecimento da moldação cerâmica até que ocorra a fusão da cera.

Esta fase é crítica uma vez que a carapaça está sujeita a tensões capazes de a fissurar, causadas pela expansão das ceras. Por este motivo é sempre aplicada uma camada de parafina na gitagem, pois o seu ponto de fusão é mais baixo, sendo a primeira a fundir, libertando espaço que será mais tarde ocupado pela cera durante a sua expansão.

No caso da ZCP, a remoção da cera é feita num *Boilerclave* de vapor de água, durante 15 minutos, a 200°C e 9 bar de pressão.

No entanto, isto não basta para que a remoção seja completa, pelo que se prossegue com uma pré-queima a 1000°C, destinada a remover a cera que não foi expulsa. Para além da pré-queima, a moldação cerâmica é submetida ao fenómeno de sinterização, sendo colocada em fornos com temperaturas entre 870°C e 1095°C. Assim, consegue-se remover a humidade e obter melhorias significativas da resistência mecânica, tornando possível à moldação suportar os gradientes de pressão e temperatura do vazamento.

5. Vazamento

Depois de removida toda a cera, passa-se à fusão do material metálico e respetivo vazamento.

O vazamento pode ser de vários tipos: por gravidade ao ar (ver figura 2.6) ou em vácuo (ver figura 2.7), por rotação (*Roll-over*) e em contra gravidade. No caso das peças consideradas neste projeto, o metal é vazado por gravidade, em vácuo.

Terminado o vazamento, o metal solidifica e é deixado a arrefecer.



Figura 2.6: Vazamento por gravidade



Figura 2.7: vazamento em vácuo

6. Abate da carapaça

O passo seguinte consiste no abate da carapaça (*knock-out*), ou seja, na remoção da camada cerâmica superficial, usando-se para tal o martelo vibratório. De seguida as peças passam para uma linha de granalhagem, onde se retira a cerâmica das peças mais simples.

No caso das ligas não ferrosas, é aplicada soda cáustica (NaOH) que corroí a cerâmica de orifícios difíceis de atingir de outra forma. Outro método consiste no uso do jato de água, cuja alta pressão é capaz de tirar a cerâmica de furos e peças de geometria complexa [8] , [9].

7. Acabamentos e obtenção da peça final

Uma vez removida toda a cerâmica prossegue-se com o corte da gitagem e do gito, de forma a separar as peças do SGA.

Assim, começa-se por remover o gito por rebarbagem, seguindo-se o polimento da zona do gito recorrendo a lixas, fresas e pedras de polimento. É essencial que o operador efetue a inspeção de defeitos, assinalando-os para que seja possível corrigi-los posteriormente por soldadura e voltarem a ser polidas.

As peças que sofrem contração no vazamento passam ainda por prensas de endireitamento.

2.3 Ceras

O material mais comumente utilizado para o fabrico dos modelos perdidos é, tal como referido anteriormente, a cera. No entanto, raramente é utilizado apenas um tipo de cera mas antes

uma combinação de diferentes tipos, obtendo-se materiais com propriedades mecânicas superiores. Alguns dos componentes presentes nestas misturas podem ser: ceras de hidrocarbonetos (parafinas e ceras microcristalinas), cera de éster natural, cera sintética, resinas (naturais e sintéticas), materiais de enchimento orgânicos e água.

As ceras de parafina são as de uso mais habitual, devido ao seu baixo custo, disponibilidade, elevada lubricidade e baixa viscosidade. Apesar de todas estas vantagens, a sua aplicação está limitada pela sua fragilidade e elevada contração. As ceras microcristalinas apresentam maior ponto de fusão do que as parafinas, pelo que são muitas vezes combinadas.

A adição de certos materiais como resinas, plásticos, fillers, plastificantes, antioxidantes e corantes contribuem para a melhoria significativa nas propriedades das ceras e, consequentemente, na qualidade da peça final em metal [11].

- **Aditivos**

O acréscimo de polímeros de elevada densidade molecular, nomeadamente *polietileno*, *acetato de vinil-etileno*, *acrilato de vinil-acetato*, *nylon* ou celulose etílica, contribui para a melhoria da resistência e tenacidade da mistura. Porém, é necessário ter em conta que estes componentes apresentam elevada viscosidade às temperaturas de trabalho da cera, pelo que a quantidade de aplicação aconselhável é limitada [11].

As distorções geométricas e rechupes, provenientes da contração durante a solidificação das ceras, podem ser reduzidos pela adição de resinas. As resinas podem ser sintéticas ou naturais, tais como a resina de pinheiro, óleo de crude e alcatrão do carvão. A seleção da resina é feita de acordo com a compatibilidade entre as ceras e polímeros da mistura [7].

- **Fillers**

A contração durante a solidificação também pode ser alcançada aplicando cargas pós inertes. Estes mantêm sempre o estado sólido, não alterando a sua configuração volumétrica. Assim, prevê-se que quanto maior a concentração destes pós, menor a contração da cera. Exemplos de cargas utilizadas são o poliestireno, bisfenol e ácido isofilático. No gráfico da figura... apresenta-se uma comparação entre o comportamento da cera quando está na presença ou ausência de cargas: verifica-se que o declive da reta é muito superior quando a mistura não é rica em cargas [6].

2.3.1 Tipos

Conforme as aplicações são utilizados diferentes tipos de cera, podendo estas estar classificadas segundo a sua composição em: ceras padrão, ceras recicláveis, ceras especiais e ceras solúveis.

- **Ceras padrão**

As ceras padrão podem ainda ser divididas em três grupos: com carga, sem carga e emulsionadas.

As ceras padrão sem carga são uma combinação de várias ceras e resinas (como se pode verificar na tabela 2.1) apresentando maior instabilidade e probabilidade de ocorrência de fenômenos de cavitação, comparativamente com as ceras com carga [12].

As ceras padrão com carga são as mais utilizadas na indústria, podendo ser recuperadas e reutilizadas. A sua constituição base é semelhante à das ceras referidas anteriormente, possuindo ainda 15 a 45% de carga. As ceras emulsionadas são semelhantes às ceras sem carga, com a particularidade de serem emulsionadas com 7-12% de água. A sua superfície é lisa e a água atua como um material de enchimento, podendo também ser recicladas [8].

Tabela 2.1: Composição das ceras padrão sem carga, utilizadas no processo de fundição por cera perdida [11]

Componentes	Composição (%)
Ceras (normalmente mais do que uma)	30-70
Resinas (uma ou duas)	20-60
Polímero (normalmente um)	0-20
Outro	0-5

- **Cera recicláveis**

Normalmente criadas pela empresa, reaproveitando a cera dos modelos, após a descerificação. Esta será utilizada nos sistemas de canais, sistemas de gitagem e alimentação e peças onde a precisão dimensional não seja exigente.

- **Ceras solúveis**

Muitas vezes pretendem-se executar modelos de cera ocos, utilizando-se, para tal, uma cera solúvel para dar forma ao volume interior [6].

- **Ceras especiais**

Um exemplo deste tipo de ceras é a cera cola, utilizada para reparar e colar modelos de cera ao sistema de gitagem e alimentação. A cera parafina pode também pertencer a esta categoria devido à sua implementação como cera de revestimento na fase de parafinação.

2.3.2 Características

O comportamento de uma cera é geralmente dependente de propriedades, tais como, ponto de fusão, expansão volumétrica, concentração de cinzas, "*fillers*", resistência à oxidação, resistência mecânica, entre outros [13].

Assim, as características essenciais à cera que leva à produção de modelos com elevada qualidade são as seguintes:

- Reduzido coeficiente de expansão térmico, contribuindo para uma maior precisão dimensional

- Ponto de fusão não muito superior à temperatura ambiente, evitando distorção de secções de elevada espessura e cavitações superficiais.
- Resistência à fratura
- Superfície suave e molhável
- Baixa viscosidade quando derretida, para preencher todas as secções da cavidade
- Facilmente removível da cavidade, após a sua formação
- Conter baixas quantidades de cinzas, para que a crosta cerâmica não as incorpore
- Não libertação gases prejudiciais para a atmosfera [4].

Tendo em conta as características acima mencionadas, é expectável que consoante a etapa do processo, algumas propriedades sejam mais importantes que outras, tal como demonstrado na tabela 2.2:

Tabela 2.2: Critérios essenciais à seleção de ceras nas diferentes etapas do processo [14]

Etapas do processo	Critérios de seleção de ceras
Injeção	Ponto de amolecimento, propriedades reológicas, tempo de processamento e estado superficial
Remoção, manuseamento e montagem	Poder lubrificante, força, dureza, resistência ao impacto, estabilidade e soldabilidade
Controlo dimensional	Expansão/contração térmica, contração na solidificação tendência à cavitação e distorção
Construção do cacho	Resistência aos solventes e aglutinantes, impermeabilidade
Remoção do modelo de cera da moldação e sinterização do material cerâmico	Ponto de amolecimento, viscosidade, difusibilidade térmica, conteúdo de cinzas
Outros	Custo, viabilidade, facilidade em reciclar, toxicidades e fatores ambientais

As ceras utilizadas na empresa ZCP variam consoante o tipo de aplicação, podendo ser dos seguintes tipos:

- **Cera Virgem:** injetada no estado líquido, é a ideal quando se pretende obter peças com tolerâncias restritas. Apresenta cor vermelha.
- **Cera plástica:** injetada num estado pastoso, apresentando tempos de arrefecimento menores. Apresenta cor azul.
- **Cera reciclada:** indicada para peças onde não seja necessário elevado nível de precisão dimensional. Apresenta cor roxa e é muito usada no fabrico das gitagem.
- **Cera solúvel:** utilizada para dar forma ao volume interior e, assim, executar modelos de cera ocos. Apresenta uma cor amarelada, sendo a sua remoção feita por ação de um ácido (ácido clorídrico).
- **Parafina:** usada no revestimento da gitagem, impedindo o contacto direto entre a carapaça e o cacho em cera. Como esta cera possui um ponto de fusão mais baixo que o da cera do modelo, funde primeiro aquando da descerificação, dando lugar a um espaço vazio para a expansão da cera do modelo. Assim, minimizam-se as tensões na carapaça minimizando o risco de fissuração [9].

2.3.3 Cera plástica

A cera plástica apresenta uma cor azulada e é uma das mais aplicadas nesta indústria, já que apresenta excelente comportamento na injeção, sendo injetada no estado semi-sólido. Apresenta baixa contração aquando do arrefecimento, sendo a qualidade dimensional da peça final bastante elevada. As suas propriedades encontram-se descritas da tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades da cera plástica (Dados internos da ZCP)

Parâmetro	Especificação	Valor obtido
Temperatura de gota (°C)	67.0-72.0	71.0
Temperatura de solidificação (°C)	63.0-68.0	66.0
Penetração da agulha (mm)	0.10-0.50	0.34
Teor de cinzas (%)	<0.030	0.008
Material de enchimento (%)	23.0-27.0	26.3
Resistência à flexão (N/mm ²)	>6.5	8.9
Cor	Azul	Azul

2.3.4 Cera reciclada

Este processo apresenta-se como uma fonte de desperdício, pelo que têm vindo a ser feitos vários estudos, no sentido de maximizar o reaproveitamento das ceras pós-descerificação. Neste sentido, surgem as ceras recicláveis [15].

O processo de reaproveitamento das ceras envolve o retorno da cera fundida no *autoclave* para processamento, realizando as operações de limpeza, filtração e ajuste das propriedades, recorrendo a aditivos.

Existem dois tipos de recuperação de cera:

- A reciclagem simples é utilizada para peças com pouca precisão dimensional. É aplicada em larga escala nos sistemas de gitagem e alimentação.
- As técnicas de reciclagem avançada permitem a modificação das propriedades da cera, através da adição de ceras inutilizadas, criando-se uma cera otimizada, que pode ser implementada como cera padrão.

A constituição da nova cera dependerá do tipo de ceras mais utilizadas em determinada série, ou seja, se maior quantidade de cera plástica for reciclada, maior será a percentagem desse tipo de cera na cera reciclada final [16].

As suas propriedades encontram-se descritas da tabela 2.4.

Tabela 2.4: Propriedades da cera reciclável (Dados internos da ZCP)

Parâmetro	Especificação	Valor
Temperatura de gota (°C)	70.0-78.0	73.1
Temperatura de solidificação (°C)	63.0-68.0	67.0
Penetração da agulha (mm)	0.30-0.60	0.48
Teor de cinzas (%)	<0.200	0.107
Material de enchimento (%)	20.0-26.5	24.5
Resistência à flexão (N/mm ²)	>6.5	8.9
Cor	Roxa	Roxa

2.3.5 Cera cola

A cera cola é uma *sticky wax* ("cera pegajosa"), concebida para auxiliar a colagem dos modelos de cera na gitagem, na fase antecedente à da formação da moldação cerâmica. Para que o operador possa executar a operação de colagem manual sem riscos para a sua saúde, é imperativo que esta cera não liberte fumos tóxicos e odores quando aquecida.

2.4 Defeitos comuns nas peças em cera

Apesar de ser considerado um processo de precisão, não é invulgar as peças em cera apresentarem defeitos. Nesses casos, terão de ser executadas operações de acabamento, que contribuem para o aumento dos custos associados. É, portanto, fulcral conhecer os diferentes defeitos que podem ocorrer, bem como as formas de os minimizar ou corrigir.

2.4.1 Defeitos originários da injeção das ceras

- **Bolhas de ar**

Este tipo de defeitos, visível na figura 2.8, pode surgir quando ocorrem fenômenos de turbulência no enchimento, fugas no sistema de injeção ou quando os parâmetros das ceras ou dos moldes não estão corretos. As soluções passam por reduzir a velocidade de caudal, monitorizar e substituir os vedantes com defeito, garantir que a cera não está danificada, que os respiros estão limpos e que o canal de injeção é capaz de evitar turbulências [8], [17].



Figura 2.8: Bolha de ar

- **Abatimento**

Defeitos de abatimento (ver figura 2.9) aparecem devido à contração ou cedência excessiva da cera quando exposta a altas temperaturas ou quando a pressão de injeção é demasiado baixa. De forma a reduzir estes problemas, pode-se colocar um arrefecedor dentro do molde, no local onde ocorre o abatimento e aumentar a pressão de injeção [8], [17].



Figura 2.9: Abatimento

- **Rugosidade superficial**

Por vezes a temperatura, a pressão e o caudal da cera não se encontram dentro dos parâmetros ideais, provocando pequenas rugosidades ou linhas de fluxo como as presentes na figura 2.10, pelo que, é importante monitorizar e regular todos os parâmetros associados, mantendo-os dentro dos intervalos ideais. No caso de mau acabamento da superfície da cavidade, deve-se polir a cavidade do molde [8], [17].

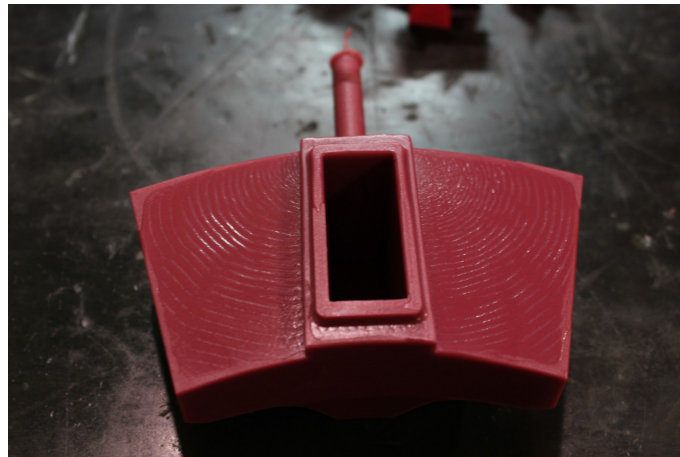


Figura 2.10: Rugosidade superficial

- **Depressões ("mal-cheio")**

Nestes casos o problema poderá encontrar-se na dosagem inadequada, bastando modificar a quantidade de cera injetada para se obterem peças perfeitas. Muitas vezes este defeito deve-se à atuação de correntes de cera contrárias, sendo necessário estudar o desenho do molde e acrescentar canais onde necessário. Este defeito encontra-se visível na figura 2.11 [8], [17].

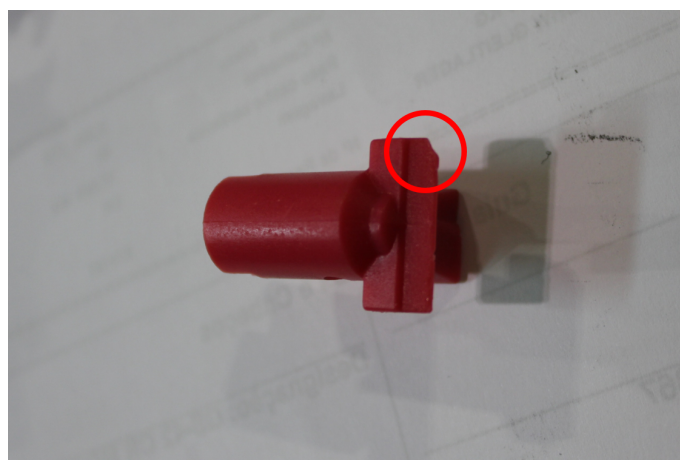


Figura 2.11: "Mal-cheio"

- **Deformação**

A deformação ocorre principalmente durante a fase de extração das peças do molde, razão pela qual se deve aplicar um desmoldante no molde. Muitas vezes este defeito também ocorre por formação de vácuo, algo que pode ser evitado se a peça for retirada lentamente do molde ou com a criação de respiros [8], [17].

2.4.2 Defeitos consequentes da colagem das peças no cacho

- **Pingos de cera**

Durante a etapa de colagem é importante ter em atenção a temperatura do ferro de soldar. Caso esta esteja demasiado alta, ocorrerá liquidificação excessiva das ceras, formando-se pingos ou salpicos nas peças, como os apresentados na figura 2.12. Caso isto aconteça, deve-se raspar o excesso de cera sem danificar a peça [8], [17].

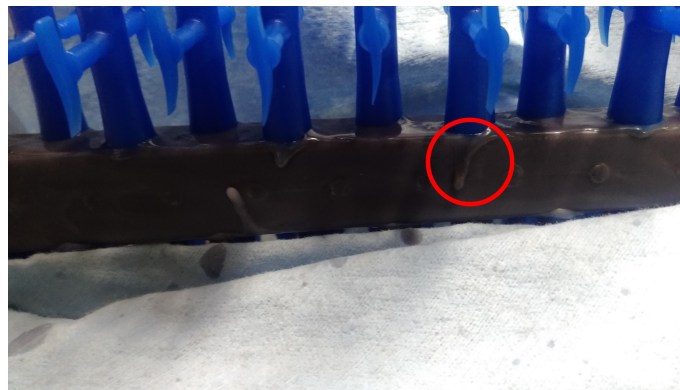


Figura 2.12: Pingos de cera

- **Falta de cera cola ou temperatura da cera cola incorreta**

Por vezes é possível obter uma boa junta de colagem sem recorrer a cera cola. No entanto, quando as peças são de elevadas dimensões, a falta de cera cola pode revelar-se problemática: o peso exercido pela carapaça cerâmica na peça é tal que esta acaba por descolar pela junta. A figura 2.13 apresenta uma junta com falta de cera cola.

O mesmo pode acontecer caso a temperatura da cera cola não esteja bem regulada. A cera cola possui um ponto de ignição de 200°C, que se deve evitar, estabelecendo um limite de 170°C para temperatura máxima a que esta cola pode estar submetida. Caso a temperatura da cera seja demasiado alta, o tempo de solidificação da junta será maior, reduzindo-se a precisão de colagem. Em contrapartida, se a temperatura for demasiado baixa, a solidificação será tão rápida que a peça não chega a colar.



Figura 2.13: Junta com falta de cera cola

- **Pingos de cera cola**

Quando se utiliza cera cola na colagem das peças à gitagem é preciso ter-se especial cuidado para que não caiam pingos de cola na peça de cera (figura 2.14). Caso isto aconteça, a peça final apresentará defeito e será sucata, pelo que a melhor solução será substituir de imediato a peça de cera com cera cola por uma peça nova, livre de defeitos [8], [17].



Figura 2.14: Pingos de cera cola

- **Junta de colagem mal seladas**

Muitas vezes a junta de colagem dos modelos de cera à gitagem apresenta-se como a da figura 2.15. Uma junta deste género é altamente problemática visto alojar partículas cerâmicas durante a fase de formação da moldação cerâmica, criando-se uma saliência frágil que poderá provocar fissuração da carapaça cerâmica durante o vazamento.

Este defeito pode ser facilmente corrigido, basta, para tal, passar o ferro quente pela junta, derretendo a cera e cobrindo a inclusão com a mesma, obtendo-se uma junta de boa qualidade, como a da figura 2.16.

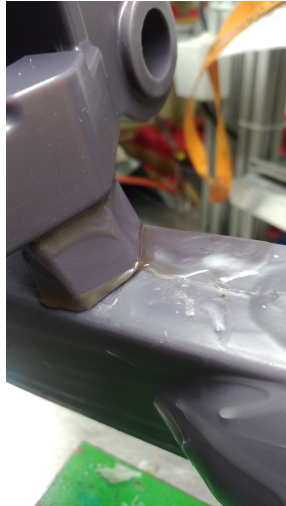


Figura 2.15: Junta mal selada



Figura 2.16: Junta bem selada

- **Espaçamento irregular**

Uma vez que a colagem das peças no SGA é feita manualmente, não existe muita precisão. As peças são coladas uma a uma, sendo que a distância entre elas é medida "a olho", havendo, portanto, margem para muitas irregularidades de espaçamento. Se as peças ficarem pouco espaçadas entre si a carapaça cerâmica não ficará bem formada, sendo que a peça final apresentará defeitos. Este defeito encontra-se representado na figura 2.17.



Figura 2.17: Espaçamento irregular

2.4.3 Junta ideal

Quando se colam as peças em cera à gitagem, deve-se procurar criar uma junta o mais perfeita possível. Neste sentido, a junta não deve possuir cantos afiados, uma vez que estes podem provocar fissurações da moldação cerâmica durante o vazamento [2].

De acordo com a figura 2.18, o *fillet* deve ser o mais suave possível, para que a junta seja geometricamente perfeita.



Figura 2.18: Exemplos juntas [2]

2.5 Benchmarking: soluções existentes no mercado para equipamentos de colagem automática

O presente capítulo destina-se ao estudo das soluções existentes no mercado.

2.5.1 Modtech

- *KAWAS - Automated Wax Assembly System*

Este sistema é constituído por dois braços robóticos, sendo um deles responsável pelo manuseamento e posicionamento das peças a colar e outro pelo posicionamento da gitagem e manuseamento da barra quente que derrete a gitagem. Cada um destes braços acopla um conjunto de ferramentas num cabeçote, sendo que a seleção de cada uma é executada pela rotação do mesmo.

O primeiro braço começa por retirar os modelos em cera do molde de injeção, recorrendo a pinças de fixação, posicionando-as num gabari (figura 2.19). Através a uma lamina presente no cabeçote (figura 2.20), o braço robótico procede ao corte do canal de alimentação que liga as peças, mudando de seguida de ferramenta para umas pinças que contactam diretamente com as peças e que serão responsáveis pelo posicionamento das peças num tabuleiro de disposição (figura 2.21).

Assim que se completa o posicionamento de uma coluna de modelos no tabuleiro, o segundo braço avança com a fixação da gitagem num gabari de suporte, como se pode ver na figura 2.22. Esta gitagem tem um formato específico para que se consiga posicioná-la no respetivo gabari.

O passo seguinte consiste na rotação do cabeçote do segundo braço, de forma a dispor-se da barra quente. Esta barra quente é encostada à gitagem durante alguns segundos, derretendo-a superficialmente. Enquanto isto, o primeiro pega na coluna de peças a colar e encosta-as ao topo da barra quente, derretendo os seus gitos, como representado na figura 2.23.

Logo que as superfícies da gitagem e do gito se encontram suficientemente derretidas, as peças são levantadas alguns centímetros, permitindo o afastamento da barra aquecida. Assim que a barra sai, o gito das peças é encostado à gitagem, ocorrendo a colagem, como apresentada na figura 2.24 [18].

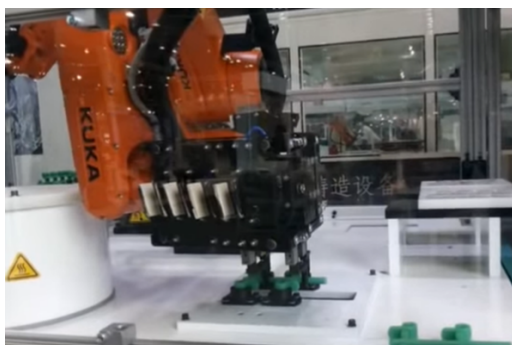


Figura 2.19: Disposição em gabari [18]



Figura 2.20: Corte dos canais[18]

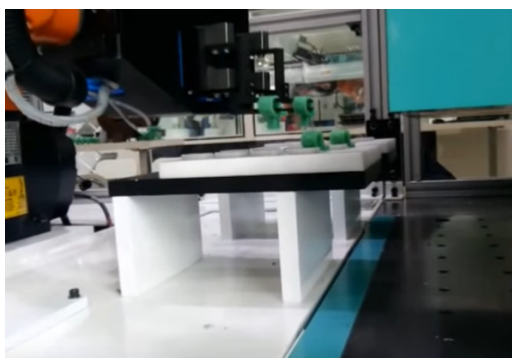


Figura 2.21: Manuseamento dos modelos[18]

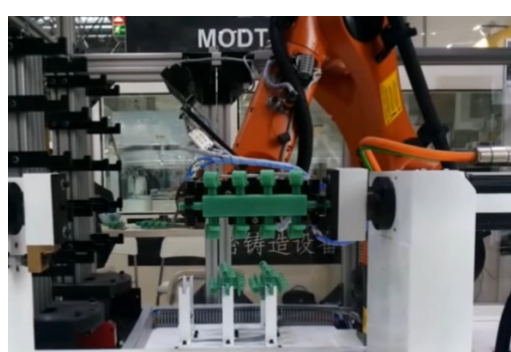


Figura 2.22: Fixação da gitagem [18]

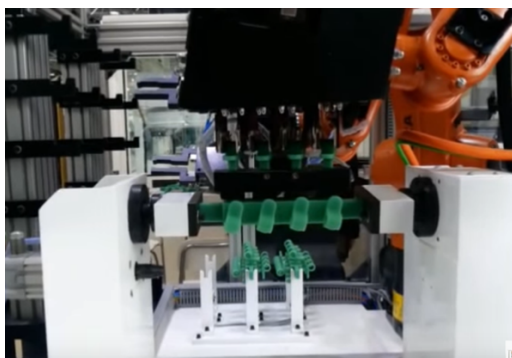


Figura 2.23: Colagem com barra quente[18]

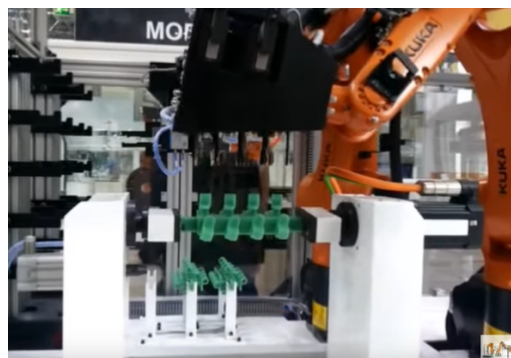


Figura 2.24: Resultado final [18]

- *Wax pattern assembly automation*

Neste sistema as peças são coladas no SGA individualmente, sendo o derretimento das ceras executado por uma pequena barra quente que se desloca ao longo de uma calha.

O braço robótico começa por pegar num dos modelos distribuídos pelo tabuleiro de disposição, recorrendo a pinças pneumáticas (visíveis na figura 2.25) que contactam diretamente com a peça. Enquanto isto, a barra quente, presente na figura 2.26, posiciona-se sob a gitagem, na posição onde irá ocorrer a colagem.

De seguida o robô encosta o gito do modelo de cera na barra, para que esta aqueça tanto o gito como a gitagem, derretendo-os (figura 2.27). O passo seguinte passa pelo afastamento da barra e o posicionamento da peça da gitagem, possibilitando a formação da junta de colagem [19].

Este sistema pode ainda ser adaptado para os casos em que não é necessário derretimento das ceras e a colagem pode ser feita recorrendo apenas a cera cola. Nesses casos, o braço robótico começa por pegar num modelo (tal como no caso anterior), mergulhando-o num pequeno reservatório de cera cola. De seguida encosta-o à gitagem, ocorrendo a colagem [19].

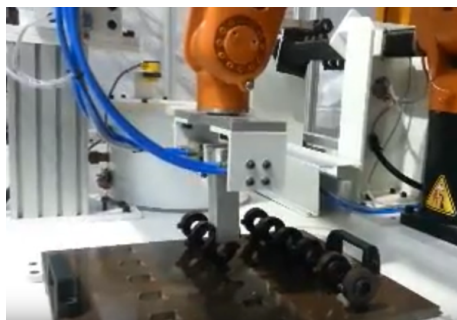


Figura 2.25: Pinça pneumática [19]



Figura 2.26: Barra quente[19]



Figura 2.27: Wax pattern assembly automation [19])

2.5.2 MPI (20-14)- Automated Pattern assembly system

A primeira etapa do processo de colagem com este sistema passa pela distribuição das peças em cera pelas cavidades por um tabuleiro de disposição, executada manualmente por um colaborador. De seguida, um braço robótico de 6 eixos com um gabari acoplado recolhe uma coluna de peças do tabuleiro e posiciona-as acima da gitagem. Como se pode ver pela figura 2.28, o gabari contacta diretamente com as peças.

Enquanto isto, outro braço robótico (de 6 eixos) encosta uma barra quente à gitagem, derretendo-a. Passados cerca de 3 segundos, o primeiro braço aproxima as peças, encostando o seu gito ao ferro quente para que também possam derreter (figura 2.29).

Logo que a cera funde o suficiente, a barra quente é deslocada para um depósito onde é sujeita a limpeza a quente, afim de retirar a cera em excesso. Enquanto isto, as peças são encostadas à gitagem, acontecendo a colagem (figura 2.30) [20].

Este processo não utiliza cera cola pelo que se prevê que a união não seja muito resistente.



Figura 2.28: Aproximação das peças [20]



Figura 2.29: Barra quente derrete peças e gitagem [20]



Figura 2.30: Aproximação das peças à gitagem [20]

2.5.3 Vulcan Engineering Co.: Truglu wax assembly

Nesta solução, desenvolvida pela *Vulcan Engineering Co.*, um braço robótico pega numa coluna de peças, recorrendo a pinças que aplicam pressão diretamente nos modelos, já posicionadas de acordo com as posições a assumir na gitagem. Começa por mergulhar metade das peças em cera cola (figura 2.31), mergulhando de seguida as restantes peças (figura 2.32). Assim que todas as peças têm cola, o robô encosta-as à gitagem, colando-as, como se pode ver na figura 2.33 [21].

Contrariamente às soluções anteriores, esta não depende do derretimento da gitagem ou do gito para se executar a colagem o que, apesar de contribuir para uma diminuição do tempo de produção, pode representar qualidade inferior ao que se obteria caso isto acontecesse.

2.5 Benchmarking: soluções existentes no mercado para equipamentos de colagem automática 25



Figura 2.31: Mergulho em cera colado lado esquerdo [21]

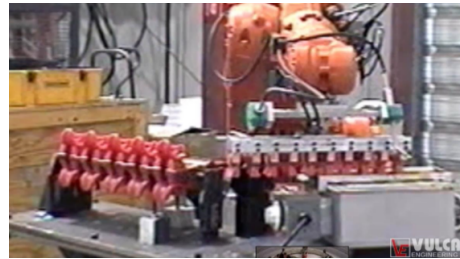


Figura 2.32: Mergulho em cera colado lado direito [21]



Figura 2.33: Colagem das peças pelo sistema da Vulcan [21]

Para além deste sistema, a *Vulcan Engineering Co.* desenvolveu uma solução em que as peças são coladas individualmente.

Neste, um braço robótico pega na peça, mergulha-a em cola e posiciona-a na gitagem. Assim que todas as peças se encontram corretamente posicionadas e coladas, um segundo braço sela as peças à gitagem na junta. Para tal, recorre a uma tocha de gás (*Aquaflame*), visível na figura 2.34 [22].



Figura 2.34: Colagem das peças recorrendo a tocha de gás [22]

2.6 Sistema de colagem e derretimento da cera

Uma vez que não existe muita informação acerca dos diferentes métodos de derretimento e colagem de ceras, estudaram-se as diferentes técnicas de soldadura nos plásticos, bem como a sua aplicabilidade na colagem de ceras.

O processo de soldadura de plásticos pode ser efetuado por aquecimento interno ou externo.

O primeiro pode ainda dividir-se em aquecimento mecânico interno, no qual se usa fricção como forma de gerar calor (vibração, ultrassons, rotação) e aquecimento eletromagnético interno, quando o calor é obtido pela absorção e conversão de radiação eletromagnética (infravermelhos, laser, frequências radio, microondas).

O aquecimento externo usa mecanismos de condução-convecção de calor para soldar as superfícies, por exemplo, ferramentas a elevada temperatura, gás, laser, entre outros [23].

2.6.1 Soldadura por barra quente com contacto

Considerado o tipo de soldadura mais comum nos plásticos, este método de aquecimento externo é utilizado em produções de grandes séries que requerem elevada fiabilidade e segurança, sendo bastante flexível.

Na soldadura por contacto de ferramenta quente há contacto entre as peças e a ferramenta, causando a condução de calor entre as superfícies, derretendo e soldando as mesmas.

Esta técnica é bastante flexível, sendo adequada tanto para soldadura manual como semi-automática. Para tal, basta que estejam presentes os seguintes componentes [23]:

- Ferramenta quente: placa aquecida por uma resistência elétrica, maquinada conforme a configuração das superfícies a soldar. É normalmente revestida a PTFE (*polytetrafluoroethylene*) para diminuir a aderência do polímero derretido à ferramenta.
- Colunas guia: confere alinhamento entre as peças e a ferramenta, auxiliando também na aplicação de pressão necessária à colagem.
- Atuadores: usados para mover a ferramenta e/ou as peças.

Outro fator importante é o facto de esta solução permitir derreter vários pontos de colagem em simultâneo, permitindo a colagem de uma coluna inteira de uma só vez. Contudo, caso a gitagem apresente curvaturas, algumas peças poderão não ficar bem soldadas à gitagem, acabando por descolar.

2.6.2 Spin Welding

Este processo consiste na fixação de uma peça (estacionária) enquanto outra peça em rotação entra em contacto com a primeira, exercendo pressão sobre a mesma, causando o seu aquecimento e consequente soldadura. Este processo encontra-se esquematizado na figura 2.35 [24].

As vantagens deste processo passam pela segurança e limpeza, já que o derretimento não vai provocar "pingos". No entanto, esta não é a solução ideal para este projeto, uma vez que as peças teriam de ser soldadas individualmente e a junta de ligação pode não ficar perfeita, e que pelo menos uma das peças a soldar tem de ser circunferencial [25].

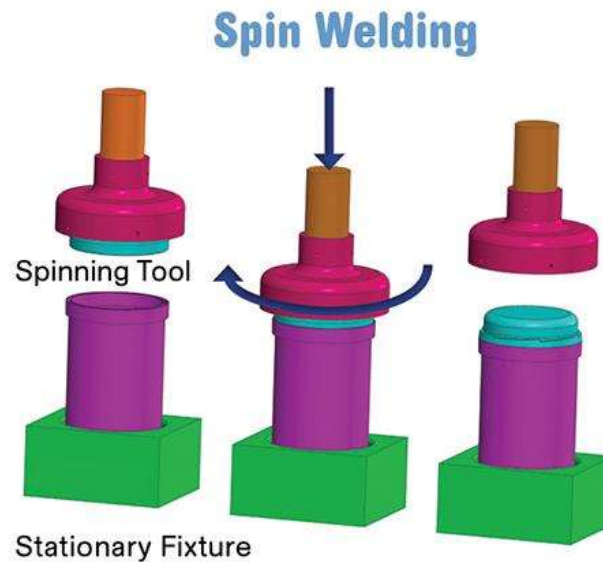


Figura 2.35: Soldadura por *spin welding* [26]

2.6.3 Soldadura por ultrassons

Esta técnica utiliza ondas sonoras de elevada frequência (ultrassons) que causam a rápida vibração dos materiais, provocando a fricção dos mesmos entre si, gerando o calor responsável pela fusão e união dos mesmos.

Este equipamento é constituído por 4 elementos essenciais, representados na figura 2.36:

- Fonte de alimentação: converte eletricidade de baixa frequência em alta
- Transdutor ou conversor: converte a eletricidade a alta frequência para som a alta frequência (ultrassom)
- Amplificador (*Booster*): Amplifica as vibrações ultrassom
- *Horn*: foca as vibrações ultrassons e transmite-as aos materiais a serem soldados [27].

Apesar de funcionar muito bem com filmes de plástico, este método não consegue efetuar a união de ceras, necessária para o presente caso de estudo.

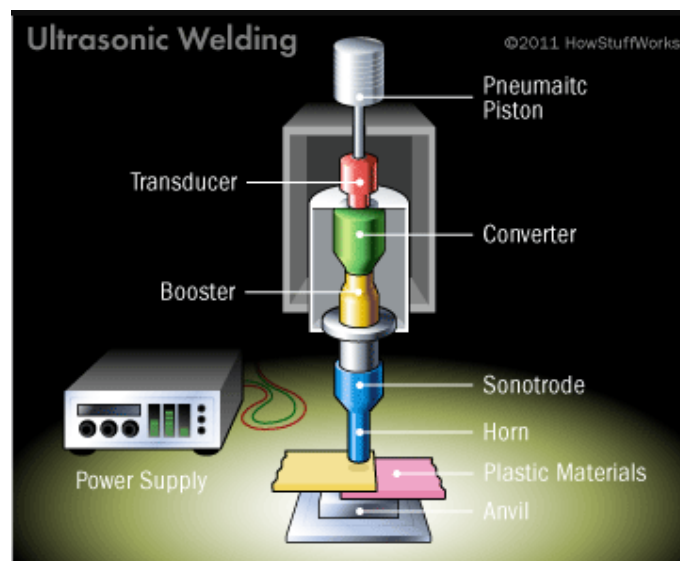


Figura 2.36: Soldadura por Ultrassons [27]

2.6.4 Soldadura por Laser

Soldadura por laser é uma solução de união de plásticos cujo resultado final é uma junta clara e sem partículas [28].

Para esta técnica é essencial que dos dois componentes a unir, um seja transparente e o outro absorvente. A radiação infravermelha é conduzida por guias de onda, passando pelo componente transparente e aquecendo o componente absorvente.

Quando se atinge a temperatura de fusão, o componente absorvente aquece o transparente (por meio de condução), permitindo a soldadura. No final, e para que se garanta a qualidade da soldadura, os dois componentes são pressionados por uma prensa. As diferentes etapas deste projeto encontram-se descritas na figura 2.37 [29].

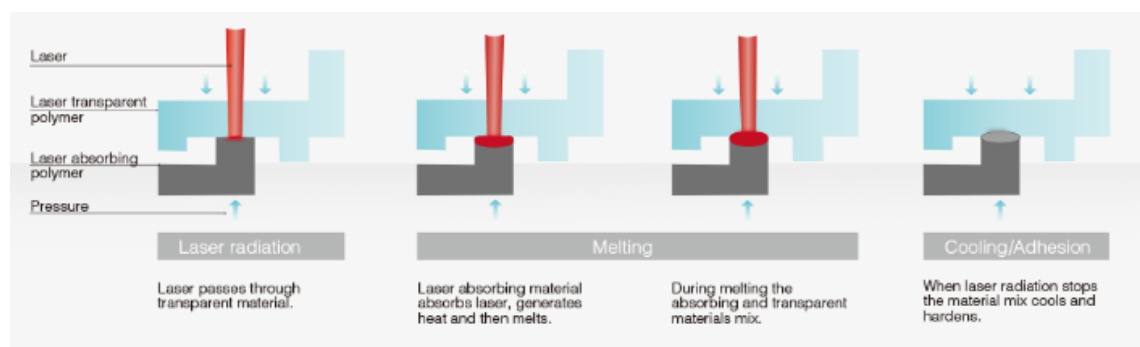


Figura 2.37: Soldadura por laser [29]

As vantagens deste método passam pelos curtos tempos de ciclo (entre 2 a 10 segundos), a ausência de marcas nas peças pelas ferramentas e pelos elementos de fixação (fonte de defeitos)

e pelas baixas tensões residuais. No entanto, esta solução apresenta elevados custos, não sendo aplicável a todos os materiais ou geometrias.

2.6.5 Soldadura por laser Infravermelho

Soldadura por infravermelhos é uma técnica de soldadura sem contacto capaz de produzir juntas resistentes e de boa qualidade. Este tipo de radiações é sentida sob a forma de calor, sendo que, quando corretamente controlada, consegue atingir temperaturas de fusão de termoplásticos num curto espaço de tempo.

O calor necessário para a fusão dos materiais é gerado por um conjunto de resistências de infravermelho montadas em paralelo. É possível concentrar as radiações emitidas recorrendo a refletores, a partir dos quais conseguimos restringir a área a aquecer [30].

Os emissores de radiação IV podem ser de onda curta ou de onda média, consoante as aplicações. Os emissores de onda curta apresentam alta densidade de potência (potência máxima= 200W/s), e por isso, maior poder de penetração, sendo o seu tempo de resposta muito rápido (cerca de 1 segundo), comparativamente com os emissores de onda média, cuja potência máxima não ultrapassa os 25W/cm e os tempos de resposta variam entre 60 a 90 segundos. Quanto às temperaturas dos filamentos, o de onda curta varia entre os 1800°C e 2400°C, enquanto que o de onda média está compreendido entre 800 a 950°C [31].

Existem ainda os emissores de onda média e resposta rápida, que apresentam uma potência máxima de 80W/cm e um tempo de resposta relativamente rápido (entre 1-2 segundos). A sua temperatura e funcionamento varia entre 1400 e 1800°C [32].

O gráfico presente na figura 2.38 demonstra o comportamento dos diferentes emissores:

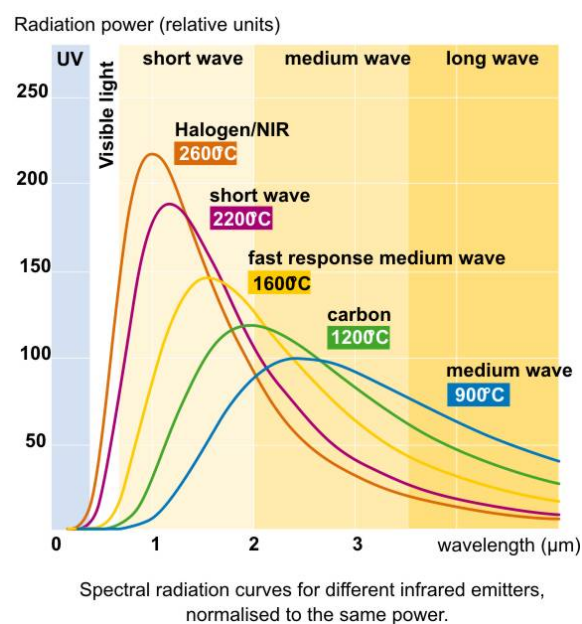


Figura 2.38: Comportamento dos diferentes emissores [32]

2.6.6 Soldadura por laser híbrido

Tal como referido no capítulo 2.7.4, no processo de soldadura de plásticos por laser, um feixe de luz infravermelho é conduzido ao longo de uma camada superior transmissora, para uma camada inferior absorvedora. A energia absorvida na interface da solda é conduzida da camada inferior para a superior (por condução), criando assim a união.

O conceito da soldadura por laser híbrido é muito semelhante, com a diferença de, para além da radiação laser, existir uma lâmpada de halógeno de elevada potência que auxilia o laser. A radiação policromática da lâmpada de halógeno ajuda a pré-aquecer e alisar as superfícies. Este processo permite uma soldadura mais rápida, com menos tensões na peça e juntas mais resistentes. A figura 2.39 apresenta uma peça tipicamente obtida por soldadura de dois materiais por laser híbrido [33].



Figura 2.39: Peça obtida por soldadura por laser híbrido [33]

2.6.7 Soldadura por frequências rádio (*Dielectric*)

Soldadura por alta frequência ou frequência rádio consiste na união de dois materiais, através do fornecimento de energia de elevada frequência, sob a forma de um campo eletromagnético e através da aplicação de pressão às superfícies a serem unidas.

Tal como se pode ver no esquema da figura 2.40, um gerador produz a energia, que é transmitida por um eletrodo. Esta energia provoca a vibração das moléculas do material, gerando-se calor que funde os materiais. Assim, não existe uma fonte externa de calor, este é gerado internamente no material. Após o arrefecimento e consequente solidificação do material, em condições de pressão controlada, uma junta resistente é formada [34].

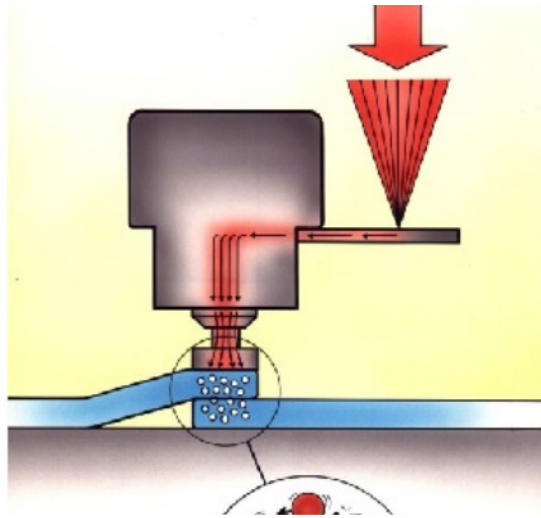


Figura 2.40: Esquematarão do processo de soldadura por alta frequência [34]

2.6.8 Hot gas welding/Aquaflame



Figura 2.41: Aquaflame systems [35]

O sistema de *Aquaflame* é ideal para aplicações de colagem de modelos de cera à gitagem na indústria da fundição de precisão, uma vez que a tocha de hidrogênio permite uma soldadura limpa e quase perfeita.

As máquinas de *Aquaflame* produzem uma chama de oxidrogênio em baixa pressão, por eletrólise. Esta chama encontra-se a elevada temperatura (entre os 1200°C e os 3300°C) sendo usada para a soldadura de materiais nas mais variadas indústrias.

Vantagens como a precisão e facilidade de controlo e uso, bem como a diminuição da emissão de fumos comparativamente com o derretimento por *hot knife*, tornam o sistema *Aquaflame* ideal para colagens de grande precisão [36].

Capítulo 3

Enquadramento experimental

3.1 Peças selecionadas

Para este projeto foram consideradas as peças do tipo A (ver figura 3.1) e B (ver figura 3.2), obtidas por injeção de cera plástica em máquinas de injeção.

Tal como referido anteriormente, estas peças foram escolhidas dado o volume de produção anual muito elevado. Para além deste aspeto, tratam-se de peças de geometria relativamente complexa e que exigem elevada precisão dimensional, pelo que exige maior repetibilidade e qualidade. Uma das etapas em que se obtém maior número de defeitos é a da colagem das peças ao SGA.

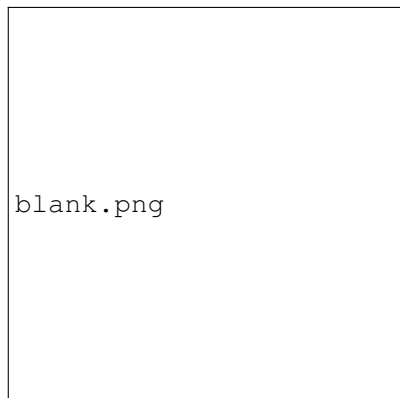


Figura 3.1: Peça A

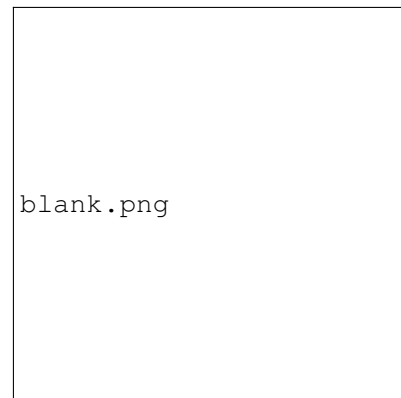


Figura 3.2: Peças B

3.2 Colagem das peças na gitagem

Logo que obtidas, as peças são recolhidas pelos colaboradores e o próximo passo consiste na sua colagem a um SGA, formando um cacho. Esta colagem é feita conforme o descrito no segundo capítulo.

Nesta fase, é entregue uma carta de colagem ao operador, especificando o tipo de sistema de gitagem a utilizar, o número de peças por cacho e a forma como estas devem ser coladas.

O SGA é obtido pela injeção de cera reciclada em moldes de injeção. Na ZCP, os moldes de gitagem permitem injetar a cera diretamente na bacia cerâmica, não sendo preciso passar pela etapa de colagem do SGA à mesma.

O operador começa por raspar e derreter a cola da bacia, de forma a tapar eventuais orifícios. De seguida, remove a parafina em excesso, utilizando uma pequena faca. Este procedimento é essencial já que a presença de parafina em excesso pode resultar no aparecimento de "pingos".

O primeiro modelo é colado numa das faces do SGA, a uma distância de cerca de 50mm, em relação ao início do mesmo, sendo a disposição dos restantes descrita pela carta de colagem.

As cartas de colagem relativas aos modelos alvo de estudo possuem as seguintes informações:

- Modelo A:

Sistema de gitagem: quadrangular com 340mm de comprimento

Peças por cacho: 52 (13 em cada secção)

Colar um escorredor entre a bacia e a primeira peça

Desgastar os escorredores para ficarem juntos ao canal de injeção da peça.

- Modelo B:

Sistema de gitagem: quadrangular (220mm de comprimento)

Peças por cacho: 20 (5 em cada secção)

Colar as peças com as letras viradas para a bacia

Colar dois escorredores frente a frente

Colar uma fiada à esquerda, as outras três ao centro

Colar escorredores pequenos nos ramais do lado contrário à bacia

Desgastar os escorredores para ficarem juntos ao canal de injeção da peça

3.3 *Layout dos cachos*

No final da colagem, o *layout* do cacho deverá assemelhar-se ao apresentado na figura 3.3 para a peça A, e ao da figura 3.4 para a peça B.

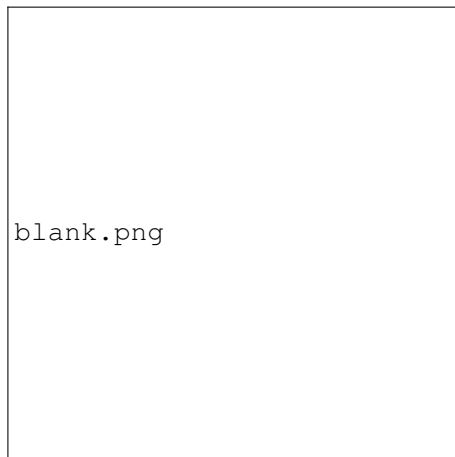


Figura 3.3: Layout do cacho para a peça A

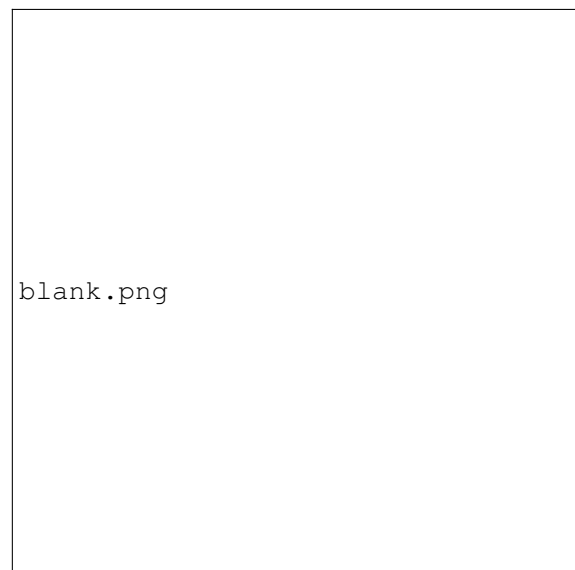


Figura 3.4: Layout do cacho para a peça B

Como se pode ver nas figuras 3.3 e 3.4, as peças não se encontram rigorosamente espaçadas e alinhadas. Tal seria de se esperar, tendo em conta que o processo é manual e que o espaçamento é feito sem rigor, usando os dedos como medida.

Assim, o primeiro passo para a concretização deste projeto passou pela de definição da distância entre a primeira peça e a bacia, e a distância entre peças.

A distância entre a bacia e a primeira peça definiu-se como sendo de 50mm.

A distância entre as peças A definiu-se como 22,6mm (ver figura 3.5). Quanto à distância entre as peças do tipo B, esta passa a ser de 38mm (ver figura 3.6).

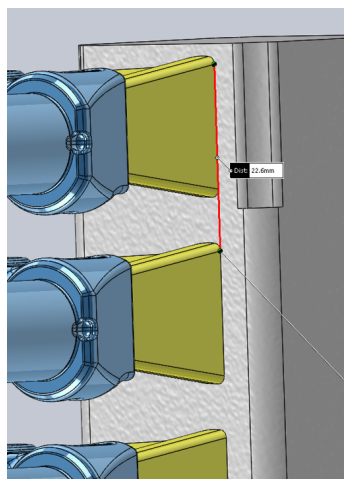


Figura 3.5: Distância entre peças do tipo A

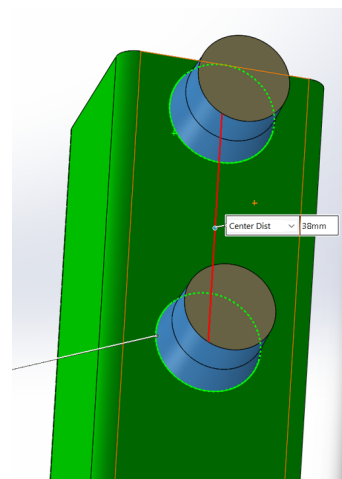


Figura 3.6: Distância entre peças do tipo B

3.3.1 Análise da aplicabilidade das soluções existentes no mercado para o presente caso de estudo

Para o presente caso de estudo pretende-se encontrar uma solução que permita a colagem de um conjunto de modelos em simultâneo numa gitagem, de forma a obter-se um cacho em pouco tempo. Para tal, foram estudados os diferentes sistemas existentes no mercado que cumprem com este propósito, como pode ser visto no capítulo 2.5.

A primeira solução encontrada (*KAWAS*) revelou-se inadequada uma vez que as pinças de fixação contactam diretamente com as peças, revelando-se uma fonte de defeitos nas peças que não sofram maquinagem numa fase final da sua obtenção. Para além disto, a gitagem utilizada neste sistema tem um formato específico para possibilitar a sua fixação no gabari de suporte, facto que impossibilita a aplicação desta solução aos SGA's utilizados na ZCP, que possuem bacias cerâmicas.

Aspetos adicionais a considerar são a sujidade do processo uma vez que a barra quente é encostada à gitagem e ao gito, ficando com resíduos de cera, e a não possibilidade de aplicação de cera cola no gito da peça a colar.

O segundo sistema desenvolvido pela *Modtech* é imediatamente excluído dado que as peças são coladas individualmente, algo que torna o processo de formação do cacho demorado. Adicionalmente a opção que recorre à barra quente não utiliza cera cola para executar a união, prevendo-se que a junta de colagem resultante não seja resistente o suficiente.

A terceira opção estudada, a *MPI- Automated pattern assembly system* é de todas a que melhor se adapta às necessidades da ZCP. No entanto, tanto o gabari de fixação dos modelos como o gabari de fixação da gitagem não são adequados para as geometrias das peças e das gitagens do caso de estudo, pelo que se teriam de projetar gabaris novos para cada uma delas. Uma vez mais as desvantagens passam pela fixação das peças que é executada através da aplicação de pressão diretamente nas peças e não utilização cera cola.

A ultima opção é de todas a que menos se adequa: para que a junta de colagem seja resistente deverá ocorrer derretimento da cera tanto da gitagem como do gito da peça a colar, pelo que se apenas se aplicar cera cola nos gitos das peças será de prever que os resultados finais não sejam favoráveis. No *layout* que recorre à tocha de gás (*Aquaflame*) considerou-se a difícil automatização e um acréscimo significativo no tempo de realização de um cacho.

Capítulo 4

Desenvolvimento de conceitos

4.1 Método de derretimento da cera da gitagem

4.1.1 Análise e seleção do conceito adequado

De forma a compreender qual das técnicas estudadas no capítulo 2.6 seria a mais adequada para o caso da colagem automática de ceras em *Investment Casting* na ZCP, elaborou-se uma matriz de decisão, presente na tabela 4.1, onde todos os conceitos foram pontuados numa escala de 0 a 5 nas categorias consideradas essenciais.

Foram considerados oito conceitos:

- T1- Soldadura por *Hot knife*
- T2- *Spin Welding*
- T3- Soldadura por ultrassons
- T4- Soldadura a laser
- T5- Soldadura por laser infravermelhos (IV)
- T6- Soldadura por laser híbrido
- T7- Soldadura por frequências rádio (*Dielectric*)
- T8- *Aquaflame*

Tabela 4.1: Matriz de decisão para o sistema de derretimento da cera

Critérios de seleção	Conceitos							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Derretimento da cera eficaz	4	0	0	2	5	3	0	5
Facilidade de automatizar	5	0	0	3	5	3	0	3
Limpeza do equipamento	2	1	1	5	5	5	1	5
Durabilidade	5	2	2	4	5	5	2	4
Custo	5	0	0	1	4	1	0	2
Segurança	4	3	3	2	4	2	3	3
Influência nas peças circundantes (derretimento das peças)	5	0	0	3	4	3	0	3
Soldadura final eficaz	5	0	0	3	5	4	0	5
Pontuação Total	35	6	6	23	37	26	6	30

O conceito T1, apesar de ser o mais simples, não é considerado o mais adequado uma vez que não obteve pontuação máxima na categoria "Derretimento da cera eficaz". Este mecanismo está altamente dependente do estado do sistema de gitagem para efetuar o derretimento de toda a face, ou seja, se a gitagem estiver distorcida (algo que acontece com frequência), nem toda a superfície de colagem derrete, uma vez que apenas algumas zonas entrarão em contacto com o ferro quente. Outro ponto que obteve uma baixa classificação é referente à limpeza do processo: o ferro contacta diretamente com a gitagem pelo que é de esperar que a cera fique colada ao mesmo, começando a pingar e sujando todo o equipamento.

O conceito T2 não promove o derretimento eficaz da cera uma vez que esta tecnologia depende da fricção para efetuar a união entre duas peças. A fricção exige a aplicação de elevadas pressões na peça, quebrando-a, o que levou à exclusão quase imediata desta técnica. Para além deste facto, a junta produzida teria mau acabamento e não há garantias do seu correto funcionamento.

Os conceitos T3 e T7 não são adequados para esta indústria. Estes mecanismos são aplicáveis em filmes de plástico, necessitando de equipamentos específicos impossíveis de automatizar para este projeto.

O conceito T4 não promove uma união muito eficaz uma vez que o laser emite grande quantidade de energia, derretendo uma espessura muito fina da cera da gitagem, que solidifica muito rapidamente. Esta tecnologia também iria trazer problemas ao nível das peças circundantes, uma vez que ao colar uma peça numa face da gitagem poder-se-ia derreter as peças previamente coladas nas restantes faces. O mesmo pode acontecer se considerarmos o conceito T6.

O conceito T8 é também difícil de automatizar, sendo que a colagem das peças teria de ser executada individualmente, acarretando maiores tempos de ciclos e consequentemente custo de produção acrescidos. O nível de segurança seria inferior visto que exigiria a circulação de gás pressurizado no setor.

Finalmente, o conceito T5 é o que parece mais adequado ao projeto considerado: é fácil de automatizar, permite a colagem de uma coluna de peças em simultâneo e a ausência de contacto entre o equipamento e a cera torna o processo de derretimento limpo. No entanto, a maior vantagem deste conceito passa pelo rápido tempo de resposta: em apenas alguns segundos consegue-se

derreter toda a superfície da gitagem.

4.1.2 Conceito selecionado para a tecnologia de derretimento da cera

Após a seleção do método a usar para o derretimento da cera da gitagem, efetuou-se um estudo das suas características essenciais, bem como do tipo de emissor a escolher.

O método de soldadura por laser infravermelho foi o escolhido pois possibilita uma transferência de calor sem contacto de calor, num curto tempo de resposta, sendo que o calor é apenas aplicado numa área definida, durante um período de tempo estabelecido.

É imperativo proceder à escolha do emissor adequado às propriedades do material a derreter, sendo que o comprimento de onda tem uma influência significativa no processo de derretimento. Tal como referido anteriormente, conforme o comprimento de onda da radiação emitida pelo refletor, diferentes comportamentos irão ocorrer [37]:

- Radiação com comprimento de onda curto consegue uma maior profundidade de penetração, assegurando a uniformidade dessa penetração, num tempo de resposta curto.
- Comprimentos de onda médios são maioritariamente absorvidos pela superfície, aquecendo-a quase exclusivamente. Os tempos de resposta são superiores.

Existem vários tipos de resistências de infravermelhos, descritas em seguida[38],[39]:

- **Resistências cerâmicas:** eficientes e robustas, proporcionam radiação de onda longa. As temperaturas de operação destes elementos estão compreendidas entre 300 e 700°C. (Ver figura 4.1)
- **Resistências de quartzo:** fornecem radiação de onda média. (Ver figura 4.2)
- **Resistências de quartzo tungsténio halogénio:** aquecem e arrefecem rapidamente, adequados para sistemas que requerem tempos de ciclo curtos. Estas podem ser emissores de quartzo tungsténio de onda média (atingem temperaturas até 1600°C), ou de halogénio de onda curta (a temperatura máxima é 2600°C). (Ver figura 4.3)



Figura 4.1: Resistência cerâmica [39]



Figura 4.2: Resistência de quartzo [39]



Figura 4.3: Resistências de quartzo tungsténio e halogénio de onda média (cima) e onda curta (baixo) [39]

Para o caso de estudo, a prioridade é a criação de juntas de colagem resistentes, no menor tempo possível, diminuindo assim o tempo de colagem de um cacho. Desta forma, o emissor ideal será de onda curta, que proporciona o derretimento da superfície da gitagem em poucos segundos. Este requisito elimina de imediato a possibilidade de aplicação da resistência cerâmica, uma vez que esta é de onda longa.

O segundo ponto a ter em conta é a temperatura que o emissor atinge: pretende-se que o emissor atinja uma temperatura elevada o suficiente para que ocorra a fusão da cera do SGA. Da mesma forma, quanto mais elevada for a temperatura de incidência, mais curto é o intervalo de tempo de derretimentos, promovendo-se uma colagem mais rápida e um aumento da produção geral. O emissor que reúne todos estes requisitos será o emissor de onda curta de quartzo halogéneo.

Assim, encomendaram-se duas resistências deste tipo ao fornecedor *Apárcio & Aparício*, com o intuito de serem montadas em paralelo. A decisão desta configuração partiu do facto de a área de incisão da radiação ser variável conforme a gitagem usada para o cacho. Desta forma esta solução pode ser aplicada a qualquer geometria do SGA, tornando o processo de colagem mais versátil.

4.1.3 Teste do conceito seleccionado

Depois de seleccionado o conceito mais adequado ao projeto e de definidas o tipo de resistências a usar, seguiu-se a realização de testes de forma a compreender como se comportariam as resistências escolhidas, quais os fatores que influenciam a colagem e de que forma estes podem ser manipulados.

Logo que as resistências infravermelhas chegaram, compreendeu-se que seria necessário projetar um refletor, de forma a restringir a luz irradiada para a área pretendida. Caso este refletor não existisse, o calor iria incidir nas peças coladas a toda a volta da gitagem, derretendo-as. Na figura 4.4 podem ver-se as resistências e o referido refletor.



Figura 4.4: Resistências em paralelo e refletor

Assim, projetou-se um equipamento para a realização de testes de colagem com as resistências IV (visível na figura 4.5) que consiste numa estrutura em forma de "U" invertido, que acopla uma barra horizontal onde está suportado o refletor e as resistências. Esta barra horizontal pode ser deslocada verticalmente, tornando possível regular a distância entre as resistências e o sistema de gitagem.

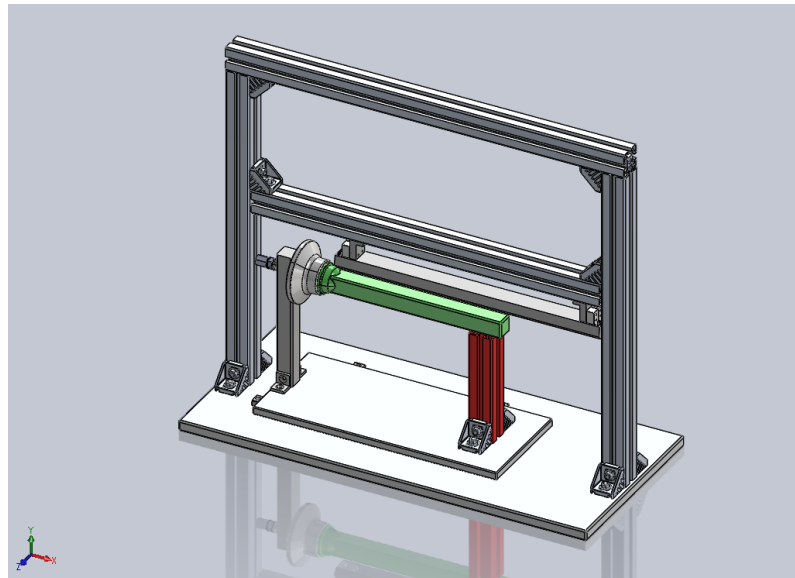


Figura 4.5: Desenho do equipamento de testes de derretimento com as resistências escolhidas

A gitagem deverá ser fixada recorrendo ao mecanismo de aperto presente na figura 4.6, e o seu correto posicionamento horizontal será assegurado por uma calha vertical.



Figura 4.6: Sistema de fixação do sistema de gitagem

Os fatores que se consideraram relevantes para os testes foram o tempo de incidência da radiação e a distância entre as resistências e a gitagem. A primeira regulou-se recorrendo a um

cronômetro e a segunda deslocando verticalmente a calha horizontal que assegura o posicionamento do refletor. O objetivo é definir-se uma distância tal que permite o correto derretimento da cera no mínimo intervalo de tempo possível. Assim, o tempo de colagem de um cacho será curto, aumentando a produtividade do processo e reduzindo custos.

O equipamento para os testes de derretimento da cera e colagem final pode ser visto na figura 4.7:



Figura 4.7: Sistema de testes

Fizeram-se dois tipos de teste. No primeiro a colagem efetuou-se recorrendo unicamente à resistência IV, e no segundo utilizou-se resistência e a cera cola.

Assim, avaliou-se a qualidade da colagem para as distâncias 7mm, 5mm, e 2mm, para diferentes intervalos de tempo. Estes testes foram realizados seguindo os seguintes passos:

1. Fixar a gitagem e definir a altura entre esta e as resistências;
2. Acionar a resistência e marcar o tempo no cronômetro;
3. Desligar a resistência assim que se atinge o intervalo de tempo pretendido;
4. Colar a peça na gitagem;
5. Deixar a cera arrefecer e solidificar;
6. Avaliar a eficácia da colagem, efetuando o teste de descolagem e verificando se a geometria da junta está perfeita.

O teste de descolagem consiste na aplicação de uma força de flexão na peça de cera semelhante à pressão que o peso da moldação cerâmica exerce no mesmo, e verificar como se comporta a junta de colagem. O objetivo é que seja difícil descolar a peça da gitagem e que a peça não parta pela junta de colagem mas sim pela zona do gito. A aplicação desta força é feita manualmente, na direção descrita na figura 4.8.

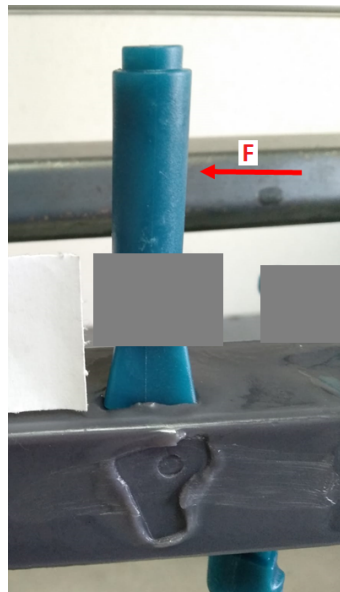


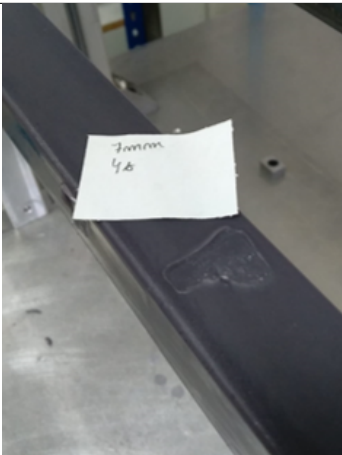
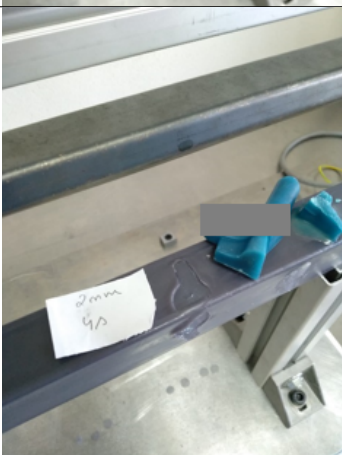
Figura 4.8: Força aplicada nos teste de descolagem

Os resultados para estes teste (sem cera cola) encontram-se na tabela 4.3, e o resumo das conclusões retiradas relativamente à eficiência das colagens encontra-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resumo dos resultados obtidos no teste de colagem com resistências IV (sem cera cola)

Distância entre refletor e SGA	Tempo de incidência	Eficiência de colagem
7mm	4s	Foi possível colar o modelo mas este foi descolado com facilidade
	3s	Teste não realizado uma vez que o teste anterior não foi eficaz
	2s	Teste não realizado uma vez que o primeiro não foi eficaz
5mm	4s	Cera derreteu melhor: colagem foi melhor mas continua a descolar com facilidade
	3s	Cera continua a derreter o suficiente para haver colagem mas a peça descola com facilidade
	2s	Cera não derreteu o suficiente. Não se conseguiu colar a peça
2mm	4s	Cera derreteu melhor porque a distância era menor. No entanto, a peça continua a descolar com facilidade. Não se realizaram mais testes com outros intervalos de tempo porque os resultados deste não foram positivos.

Tabela 4.3: Resultados dos testes de colagem e descolagem, recorrendo apenas às resistências IV

Parâmetros	Teste de colagem	Teste de descolagem
7mm 4s		
5mm 4s		
5mm 3s		
2mm 4s		

Tal como previsto pelos ensaios descritos no segundo capítulo, a colagem não é eficaz quando apenas se derrete o SGA. Assim, o passo seguinte passou pela realização de ensaios de colagem usando as resistências para derreter a gitagem e cera cola a elevada temperatura aplicada no gito do modelo em cera.

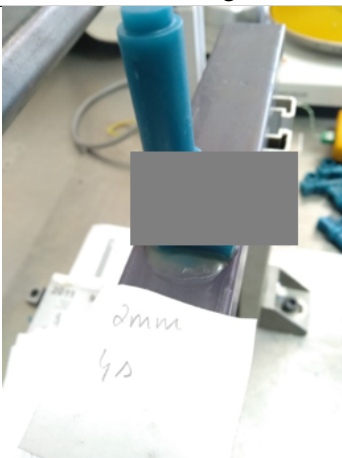
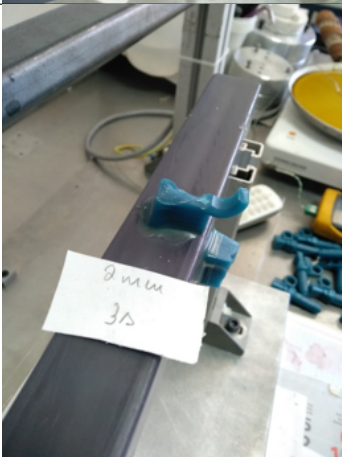
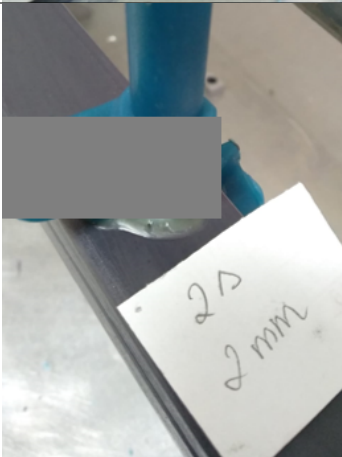
Para estes testes fixou-se a distância entre o refletor e o SGA em 2mm, uma vez que está comprovado ser a distância com melhores resultados. Testou-se a eficiência da colagem para intervalos de incidência de 2, 3 e 4 segundos, seguindo os seguintes passos:

1. Fixar a gitagem a 2mm de distância do refletor;
2. Acionar a resistência e marcar o tempo no cronómetro; enquanto a resistência aquece a gitagem, mergulhar o gito da peça em cera cola com temperatura compreendida entre 160 e 170°C, encostando o gito à base do fogão, aquecendo-o também;
3. Desligar a resistência assim que se atinge o intervalo de tempo pretendido;
4. Colar a peça na gitagem;
5. Deixar o conjunto arrefecer e solidificar;
6. Avaliar a eficácia da colagem, efetuando o teste de descolagem. Avaliar também a qualidade da junta de ligação.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 4.4.

No decorrer deste teste também se verificou que a temperatura da cera cola que permite obter melhores resultados a nível de qualidade da junta é de 165°C. A esta temperatura conseguem obter-se juntas geometricamente perfeitas, com *fillet* subtil e sem cantos com arestas vivas.

Tabela 4.4: Resultados dos testes de colagem e descolagem, usando cera cola

Parâmetros	Teste de colagem	Teste de descolagem
4s		
3s		
2s		

Os resultados destes testes foram muito positivos: a adição da cera cola e do aquecimento do gito tornam a colagem resistente ao ponto de, quando aplicada pressão, a peça partir mas não descolar na junta.

4.2 Sistema de manipulação das peças

Depois de estudados os sistemas de colagem já existentes no mercado, compreendeu-se que a melhor forma de executar a manipulação das peças em cera seria recorrendo a um conjunto de *grippers*, adaptados e acoplados a um braço robótico. O braço robótico teria a função de ir buscar as peças que seriam previamente dispostas em tabuleiros pelos operadores.

Trata-se de uma operação de *pick-and-placement* (recolha-e-posicionamento). A operação *pick* (recolha) dos modelos em cera dos tabuleiros será executada por um conjunto de *grippers*, acoplados a um braço robótico. O braço é o responsável pelo movimentos do conjunto (*grippers* + modelos) desde o tabuleiro até ao SGA, passando pelo reservatório de cera quente (*placement*).

Uma vez que a geometria das peças a manipular é muito diferente, optou-se por fabricar sistemas de manipulação separados para cada tipo de série, sendo os seus requisitos essenciais descritos seguidamente:

- Em geral, os sistemas de manipulação não podem exercer pressão diretamente nos modelos de cera para não causarem defeitos. No entanto, pode ser aplicada pressão no veio das peças da série A uma vez que este vai ser posteriormente maquinado;
- É preciso ter em conta o espaço disponível para a abertura das pinças para que estas não batam umas nas outras;
- Deverão assegurar a boa fixação das peças para que o seu manuseamento possível sem que nenhuma caía, e para que as peças sejam coladas na gitagem na posição definida.

Assim, desenvolveram-se três conceitos para cada sistema de manipulação, descritos nos seguintes subcapítulos.

4.2.1 Sistema de manipulação para as peças da série A

1. Conceito MB1: Cassete individual

Como se pode ver na figura 4.9 esta solução consiste num bloco, com uma cavidade com a forma exata da peça a manipular, dividido a meio. O objetivo seria o braço acoplar este sistema, que encaixaria na peça posicionada no tabuleiro, conseguindo movimentá-la.

A cavidade teria de conter uma camada de silicone para não causar danos na peça em cera. Esta solução não necessita de *grippers* pelo que acarreta menores custos, no entanto é muito difícil de fabricar.

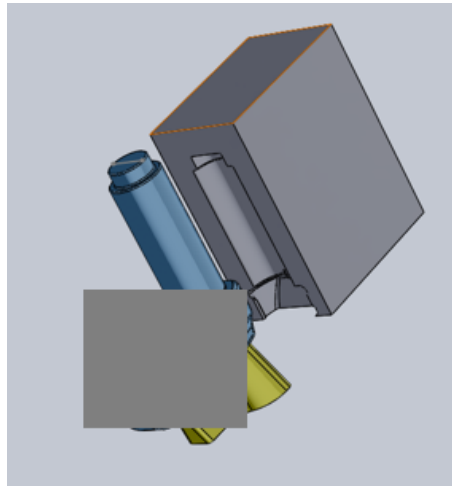


Figura 4.9: Conceito MB1

2. Conceito MB2: Pinça "Meia-lua"

Este conceito resume-se a um conjunto de duas pinças em forma de meia lua, que serão acopladas a um *gripper*. Uma vez que este conceito implica que as pinças estejam em contacto direto com a peça e não com o gito, é imperativo que seja aplicada uma camada de silicone no interior da meia lua, de forma a não provocar defeitos.

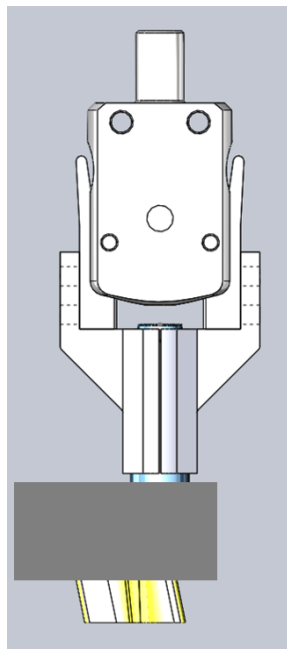


Figura 4.10: Pinças "meia-lua"fechadas

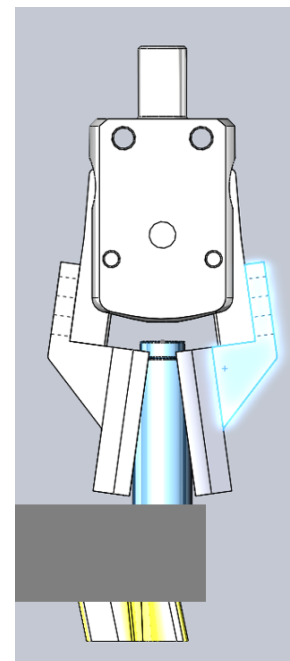


Figura 4.11: Pinças "meia-lua"abertas

3. Conceito MB3: Cilindro com O'ring

O conceito MB3 (figura 4.12 e 4.13) consiste num cilindro, no interior do qual está acoplado um *o'ring*. O funcionamento deste mecanismo é semelhante ao de uma câmara de ar: a parte cilíndrica da peça é inserida no seu interior, e para a sua fixação e consequente manipulação deverá ativar-se uma válvula que permitirá a entrada de ar comprimido na abertura onde o *o'ring* está inserido. A entrada do ar a elevada velocidade contrai o *o'ring*, que passa uma pressão uniforme ao longo da peça de cera. Quando se corta a entrada de ar, o *o'ring* volta a expandir, criando uma folga para libertar a peça.

Deste modo, consegue-se pegar e soltar o modelo, sem o danificar.

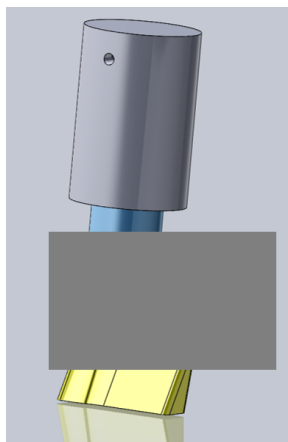


Figura 4.12: Conceito MB3

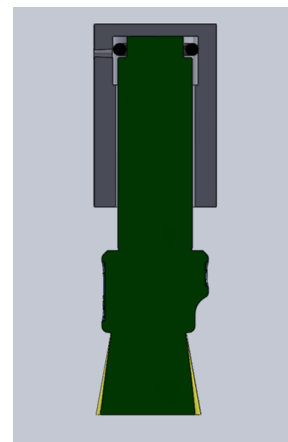


Figura 4.13: Vista em corte do conceito MB3

4.2.2 Análise e seleção do conceito adequado

A tabela 4.5 representa a matriz de decisão para os conceitos descritos. Nesta, as diferentes soluções foram avaliadas quantitativamente (numa escala de zero a cinco) em vários parâmetros.

Tabela 4.5: Matriz de decisão para o sistema de manipulação das peças do tipo A

Critérios de seleção	Conceitos		
	MB1	MB2	MB3
Espaço disponível para abertura das pinças	1	5	1
Capacidade de manuseamento das peças	3	4	2
Robustez do aperto	3	4	2
Capacidade para manter a integridade da peça	3	4	5
Facilidade de automatizar	3	5	2
Durabilidade	4	4	3
Facilidade de fabrico	4	4	2
Possibilidade de exercer pressão	1	4	2
Pontuação Total	22	34	19

Através da matriz de decisão concluiu-se que tanto o conceito MB1 como o MB3 não são adequados, visto que o espaço disponível entre as peças não é suficiente para possibilitar a abertura

da cassete e o posicionamento no cilindro. Para além disto, a capacidade de manuseamento, a robustez do aperto e capacidade de exercer pressão verticalmente não são consideradas eficazes o suficiente.

Assim, o conceito seleccionado é o MB2, que garante o bom aperto e posicionamento das peças sem as danificar, sendo ainda uma solução fácil de fabricar. Para esta solução já não existe o problema da limitação do espaço de abertura das pinças.

Quanto ao *gripper* a usar, este deverá garantir uma abertura suficiente das pinças para que estas se consigam posicionar nas peças, não danificando as peças coladas nas periferias. A sua escolha deverá também ter em conta que o espaçamento em peças é muito curto, pelo que os *grippers* seleccionados não poderão ser muito grandes.

A figura 4.14 mostra o protótipo, obtido por impressão 3D, do conceito seleccionado.

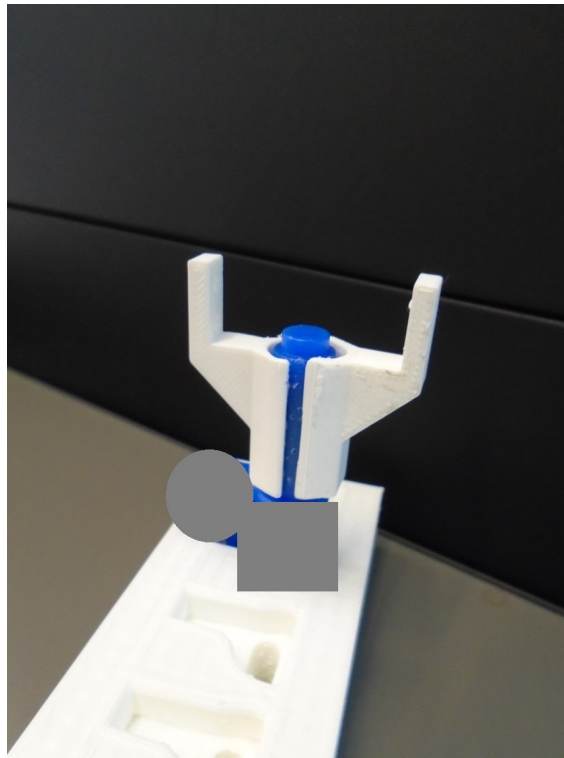


Figura 4.14: Protótipo do conceito MB2

4.2.3 Sistema de manipulação para as peças da série B

1. Conceito MT1: Pinças topo do ramal

As pinças da figura 4.15 tem como função a fixação para manipulação do ramal da série B, tendo que ser acopladas a um pequeno *gripper*. A fixação é feita na zona do gito pelo que não é preciso adicionar uma camada de silicone nem ter especial cuidado, uma vez que depois de obtida a peça em metal vazado se irão remover estes gitos.

Para esta solução, o tabuleiro para a disposição das peças terá de ser um no qual a fixação das peças seja feita pela base, caso contrário estas pinças não funcionarão.

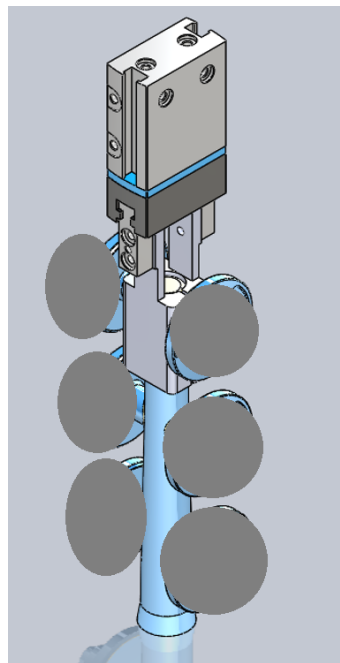


Figura 4.15: Conceito MT1

2. Conceito MT2: Pinças de encosto

Este conceito (figura 4.16), tal como o anterior, resume-se a duas pinças de encosto que deverão ser associadas a um *gripper*. A abertura das garras do *gripper* provocará a expansão das pinças, que se irão encostar às faces interiores das peças dos ramais. Esta expansão irá provocar uma pressão nas peças tal que permite a sua elevação e manipulação. Uma vez mais, é necessário aplicar uma camada de silicone nas pinças, visto que estas exercem pressão diretamente nas peças.

Tal como na solução anterior, o tabuleiro de disposição terá que fixar os modelos pela base.

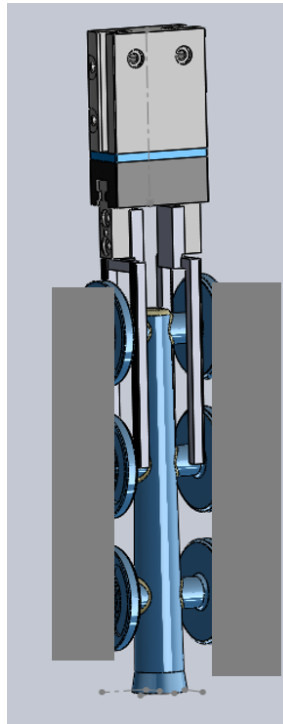


Figura 4.16: Conceito MT2

3. Conceito MT3

Tal como se pode ver na figura 4.17 esta solução consiste em duas pinças (acopladas a um *gripper*) que se posicionam na base da peça para executarem os movimentos de *pick-and-placement*. Esta solução só seria funcional se associada a um tabuleiro tal que fixasse a peça pelo seu topo, possibilitando a sua manipulação pela base do ramal.

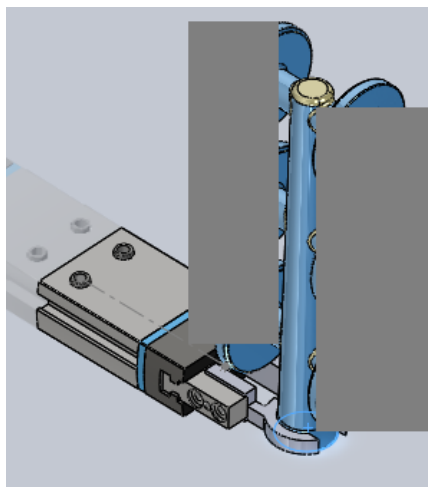


Figura 4.17: Conceito MT3

4.2.4 Análise e seleção do conceito adequado

A tabela 4.6 consiste numa matriz de decisão, na qual os diferentes conceitos foram classificados numericamente, numa escala entre 0 e 5.

Tabela 4.6: Matriz de decisão para o sistema de manipulação das peças do tipo B

Critérios de seleção	Conceitos		
	MT1	MT2	MT3
Espaço disponível para abertura das pinças	3	5	1
Capacidade de manuseamento das peças	4	2	2
Robustez do aperto	5	3	3
Capacidade para manter a integridade da peça	5	2	5
Facilidade de automatizar	5	5	3
Durabilidade	5	4	5
Facilidade de fabrico	5	4	5
Possibilidade de exercer pressão	4	3	3
Pontuação Total	36	27	27

O conceito MT2, apesar de ser fácil de fabricar e automatizar, não é adequado uma vez que o contacto e a aplicação de pressão diretamente na peça poderá originar defeitos. Para além disso, a capacidade de manuseamento e aplicação de pressão verticalmente (no SGA para proporcionar a colagem) não é suficiente para ser considerada uma solução eficaz.

O conceito MT3 é imediatamente excluído uma vez que o espaçamento entre as peças a colar é muito limitado, não havendo espaço para a abertura das pinças. Para além deste ponto, também é de considerar que esta solução é complexa de automatizar.

O conceito selecionado é, então, o MT1, que de todos é aquele que apresenta maior robustez de aperto, sem danificar a peça. Espera-se que o manuseamento destas peças seja simples e fácil de automatizar, sendo possível a aplicação de pressão na gítagem para a colagem das peças. A maior desvantagem desta solução é a limitação no espaço para a abertura das pinças. Será preciso ter-se especial atenção a este aspeto aquando da seleção dos *grippers*, pelo que ainda está a ser estudada a possibilidade de os fabricar internamente dado que, até à data, não foram encontrados *grippers* com estas especificações no mercado.

A figura 4.18 representa o protótipo desta solução.

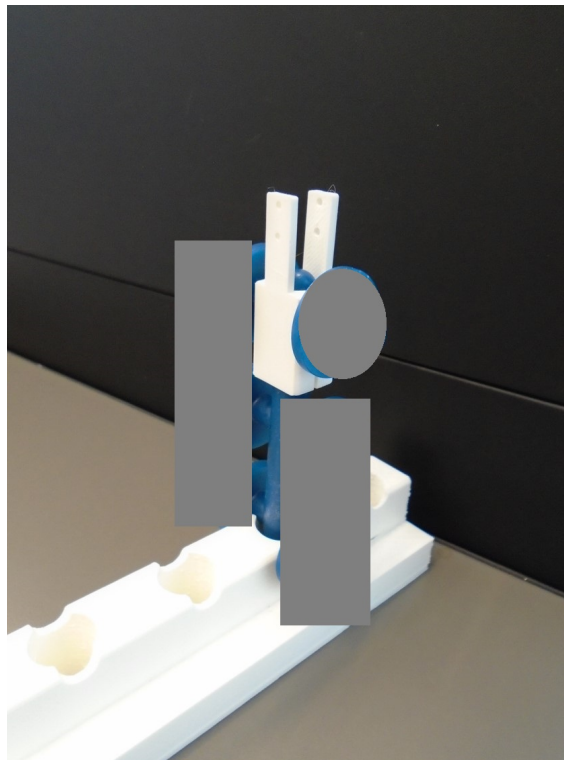


Figura 4.18: Protótipo do conceito MT1

4.3 Tabuleiros de disposição

Uma vez que se pretende que o *robot* se dirija ao tabuleiro e recolha as peças previamente posicionadas, optou-se por desenhar os tabuleiros de forma a que estes disponham as peças já espaçadas de acordo com a sua posição no SGA e corretamente orientadas.

Assim, o tabuleiro destinado às peças do tipo A deverá possuir 4 colunas, cada uma com espaço para 13 modelos de cera. Desta forma as 13 peças, destinadas a uma das faces do SGA, poderão ser recolhidas e coladas ao mesmo tempo.

Quanto aos tabuleiros para as peças da série B, estes deverão apresentar 4 colunas, cada um com 5 encaixes para os modelos.

O design dos tabuleiros deverá ter em conta os seguintes aspetos:

- Evitar o contacto entre as peças e o tabuleiro para evitar defeitos. A melhor solução passa pela fixação das peças pelo gito, uma vez que estes vão ser removidos.
- Ter em conta que se podem instalar resíduos de cera nos orifícios, pelo que as soluções devem ser fáceis de limpar.
- Não possuir arestas vivas

4.3.1 Tabuleiro de disposição para a peça A

Para a peça A, considerou-se apenas um conceito para o design do tabuleiro, dado que existia apenas uma zona da peça pela qual se podia fazer o posicionamento. A solução encontra-se na figura 4.19. Este design consiste numa cavidade com a forma do gito do modelo, sendo as peças posicionadas pelo mesmo.

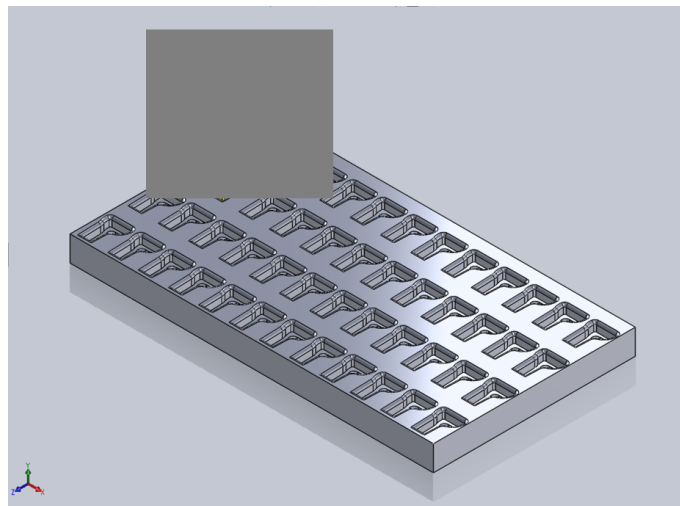


Figura 4.19: Conceito de tabuleiro para as peças da série A

No entanto, existe um pormenor que inicialmente não se considerou e que acabou por se revelar essencial: as peças da série A são obtidas recorrendo a máquinas de injeção, em conjuntos de duas peças, ligadas pelo canal de injeção. Este canal de injeção é cortado por tesouras automatizadas, logo que os modelos são retirados do molde. No entanto, muitas vezes as tesouras não estão bem calibradas e o corte não é preciso, tornando necessário que o operador o elimine, raspando-o com uma faca ou derretendo-o com um ferro quente. A solução para este problema passou pela adição de um pequeno furo na base da abertura onde a peça será posicionada, destinado a albergar os resíduos do canal de alimentação, quando este não é corretamente cortado (ver figura 4.20).

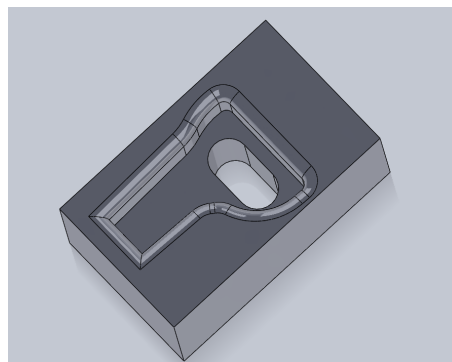


Figura 4.20: Furo para canal de alimentação

4.3.2 Tabuleiro de disposição para a peça B

Para as peças da série B desenhara-se três conceitos diferentes (TAB1, TAB2 e TAB3) descritos em seguida:

1. Conceito TAB1

O tabuleiro TAB1 pode ser visto na figura 4.21. A peça em cera é posicionada pela base no orifício redondo, sendo a correta orientação do ramal garantida pelos orifício onde encaixam os discos.

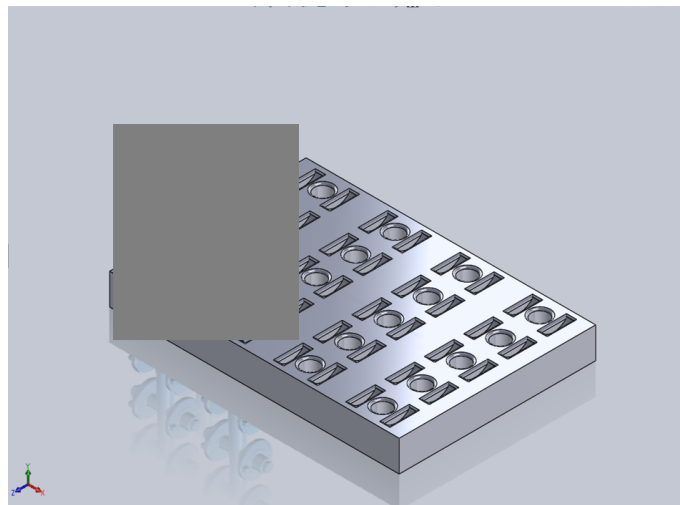


Figura 4.21: Conceito TAB1

2. Conceito TAB2

Este conceito, presente na figura 4.22, consiste numa fixação pela base e ao longo da gita-gem. Desta forma a peça não se consegue mover nem rodar sobre si própria, assegurando-se o correto posicionamento e orientação da mesma.

O orifício central deverá ser da altura do tabuleiro para evitar que resíduos de cera se alojem no mesmo.

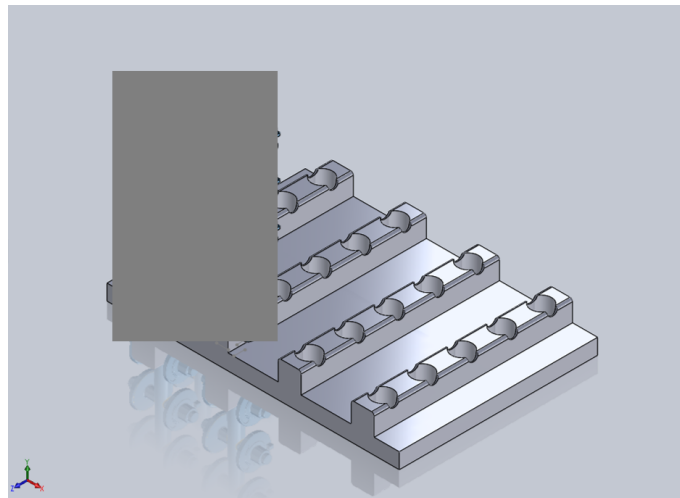


Figura 4.22: Conceito TAB2

3. Conceito TAB3

O tabuleiro TAB3 (figura 4.23) é um conceito semelhante ao TAB2 com a diferença de o suporte não ser na base mas antes no topo do ramal. Mais uma vez, não existe o risco de danificar as peças por contacto, tornando-o uma solução atrativa.

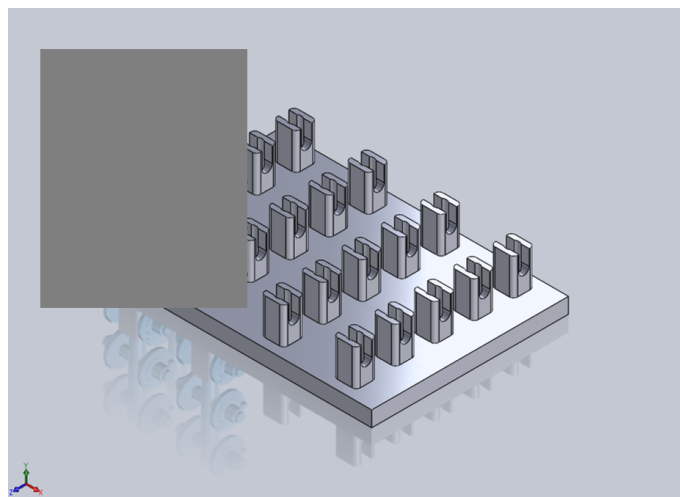


Figura 4.23: Conceito TAB3

4.3.3 Análise e seleção dos conceitos adequados

Tal como referido anteriormente, apenas foi desenhado um conceito para o tabuleiro de disposição das peças da série A. De forma a compreender se este design era efetivamente funcional

obteve-se um protótipo por impressão 3D, visível na figura 4.24, tendo-se concluído que este conceito permite uma boa fixação dos modelos de cera, sendo fácil ao operador posicionar os mesmos.

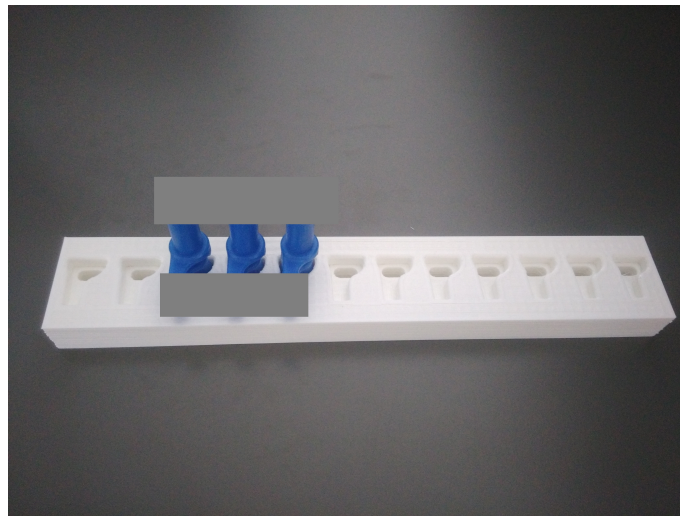


Figura 4.24: Protótipo do conceito para o tabuleiro de disposição para peças do tipo A

Para compreender qual dos conceitos (TAB1, TAB2 e TAB3) seria o mais adequado para o tabuleiro de disposição das peças da série B, elaborou-se uma matriz de decisão, presente na tabela 4.7, onde todos os conceitos foram pontuados numa escala de 0 a 5 em categorias consideradas relevantes.

Tabela 4.7: Matriz de decisão para o tabuleiro de disposição das peças da série B

Critérios de seleção	Conceitos		
	TAB1	TAB2	TAB3
Espaço disponível para abertura das pinças	3	3	3
Capacidade de manuseamento das peças	2	5	3
Estabilidade da fixação	2	5	4
Facilidade de encaixe das peças pelo operador	3	5	2
Capacidade de manter a integridade da peça	2	5	4
Durabilidade	5	5	5
Facilidade de fabrico	3	5	3
Pontuação Total	20	33	24

Como se pode ver, o tabuleiro TAB1 não é o mais apropriado visto que existe uma grande probabilidade de o operário fazer pressão na peça contra o tabuleiro, ao encaixa-la, danificando-a. A figura 4.25 mostra o protótipo deste tabuleiro, obtido por impressão 3D. Como se pode ver, esta solução não garante a estabilidade da fixação.

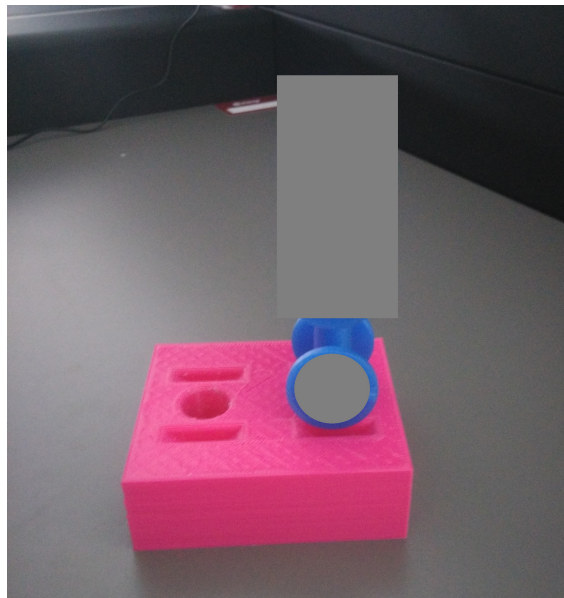


Figura 4.25: Protótipo TAB1

O conceito TAB3, apesar de ter obtido melhor classificação do que o TAB1, não é ideal visto que é difícil de fabricar e o operador teria mais dificuldade em encaixar as peças. Para além disto, não é garantido um alinhamento perfeito entre os ramais, dificultando a operação de *pick-and-placement* do conjunto *grippers* + braço robótico.

O conceito aprovado É então o TAB2. Uma vez que a fixação é feita ao longo do gito (que será removido numa fase final) e não na peça, não existirão tantos defeitos consequentes do contacto entre o tabuleiro e a peça. A a estabilidade da fixação desta solução é também muito maior, comparativamente com as restantes, sendo um conceito muito mais fácil de fabricar e utilizar que os anteriores. A figura 4.26 representa o protótipo obtido por impressão 3D.

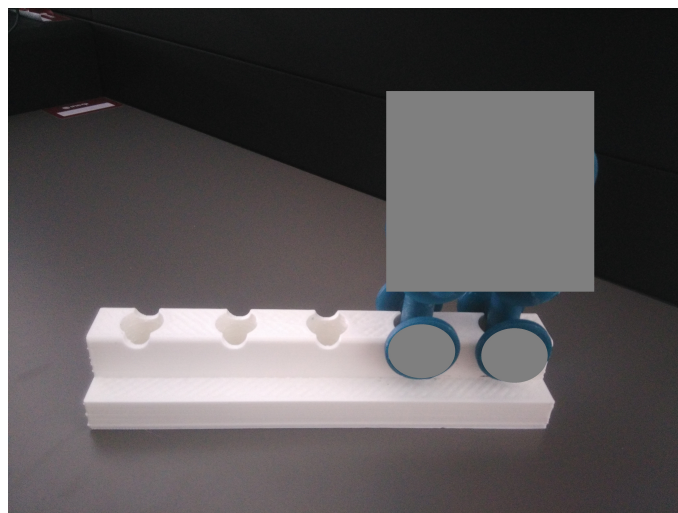


Figura 4.26: Protótipo TAB3

4.4 Sistema de fixação e rotação da gitagem

O sistema de fixação e rotação da gitagem resume-se a um gabari cujo objetivo essencial consiste no posicionamento e fixação do SGA, para que as diferentes peças possam ser soldadas às suas faces. De forma a ser possível executar a colagem em todas as faces, é igualmente importante que o gabari permita a rotação da gitagem em 360°.

Para além destes requisitos, é recomendável que este sistema assegure a fixação de uma forma robusta, aguentando o peso dos cachos e garantindo a planeza da gitagem. Assim, optou-se por efetuar a fixação da gitagem com apoios dos dois lados da mesma, em vez de a fixar apenas pela bacia, como se faz no processo manual.

Por último, outro aspeto importante e que inicialmente não se considerou é a distância entre a gitagem e as resistências. Apesar de esta ser definida pelo braço robótico ao qual a resistência está acoplada, o design do sistema de fixação não pode comprometer este requisito.

Mais uma vez, foram idealizados 3 conceitos diferentes, tendo-se no final escolhido qual o mais adequado.

4.4.1 Conceitos para o sistema de fixação e rotação da gitagem

1. Conceito FR1: Casquilho com manípulo + fixador de topo

Neste conceito, a fixação da bacia é feita recorrendo a um sistema desenvolvido pela ZCP e adaptado para o caso de estudo. Este mecanismo, presente na figura 4.27, é usado durante a etapa de formação da moldação cerâmica, como forma de fixação dos cachos ao discos da linha de secagem (Figura 4.28).



Figura 4.27: Sistema de aperto da bacia



Figura 4.28: Cachos presos ao disco

O funcionamento deste mecanismo é bastante simples: a peça é posicionada no interior do casquilho da gitagem. Ao apertar a porca A, a peça C vai deslocar-se para cima, exercendo pressão sobre a peça B, esmagando-a. Por consequência, as anilhas D vão expandir, exercendo tal pressão na parede interior do casquilho que se consegue segurar um cacho, por mais pesado que seja.

A maior desvantagem deste mecanismo é a necessidade de roscar e desenroscar a porca A de cada vez que se posiciona um cacho, o que acaba por aumentar o tempo de ciclo de colagem, atrasando o processo. De forma a resolver este problema, e para o presente caso de estudo, adaptou-se este conceito, substituindo a porca de aperto por um manípulo, visível na imagem [4.29](#).

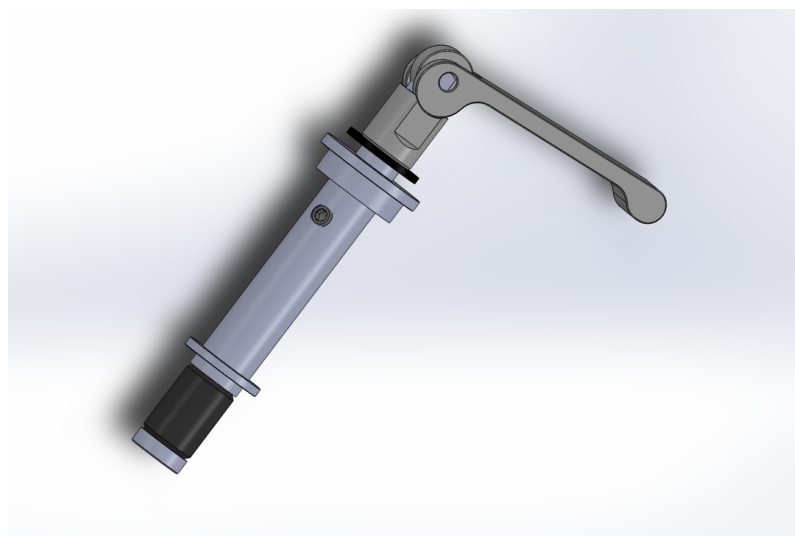


Figura 4.29: Sistema de aperto com manípulo

A fixação da outra extremidade do cacho ficou ao encargo de um fixador de ponta. Começou-se por considerar o fixador da figura [4.30](#). No entanto, depois de se efetuarem os testes com as resistências, percebeu-se que esta solução não iria funcionar: a distância entre as resistências e a gitagem definida em é de 2mm, algo que não é possível garantir ao usar um fixador com 3mm de altura em relação à gitagem (ver figura [4.31](#)).

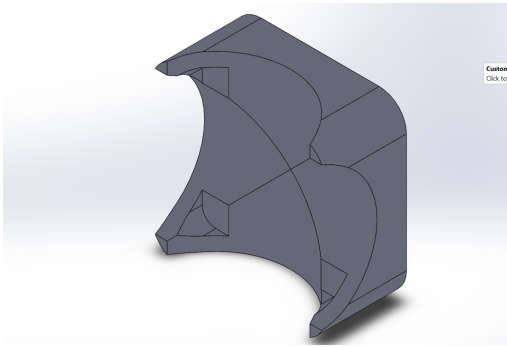


Figura 4.30: Primeiro fixador de ponta

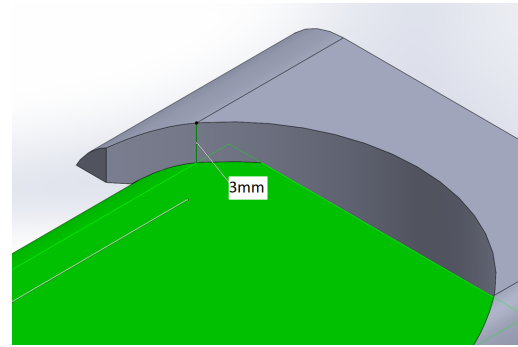


Figura 4.31: Altura do primeiro fixador

A solução para este problema passou pela modificação do design do SGA, criando-se umas reentrâncias nos seus cantos (ver figura 4.33) e redesenhando-se o fixador de topo, apresentado na figura 4.32. Assim, diferença de alturas do fixador e da gitagem é de 1mm, o que torna possível manter a resistência a 2mm de distância em relação à gitagem.

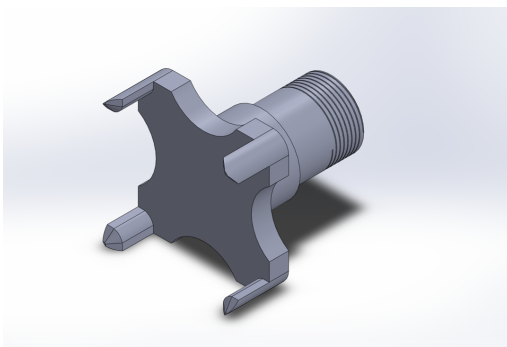


Figura 4.32: Fixador de ponta FR1

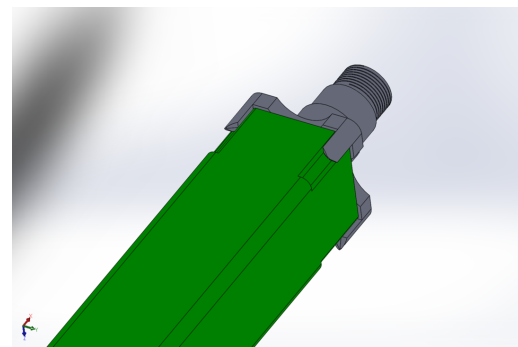


Figura 4.33: SGA modificado

A distância entre o fixador de topo e o fixador da bacia não é fixa: a estrutura que posiciona o fixador de ponta estará assente sobre uma guia linear que tratará dos movimentos de avanço e recuo do mesmo. Assim, antes de começar o processo de colagem, a guia linear começa por afastar o fixador de ponta para que se possa fixar o SGA pela bacia. Assim que a bacia está fixa, a guia linear trata de aproximar o fixador de ponta, e lentamente posiciona-o na ponta da gitagem. De seguida procede-se com a colagem das peças e, quando esta termina, a guia volta a afastar o fixador para que se possa remover o cacho feito e voltar a inserir uma gitagem.

De forma a se poderem colar peças nas diferentes faces, é necessário que a gitagem possa rodar horizontalmente, pelo que tanto o fixador da bacia como o de ponta estarão apoiados em rolamentos. O processo de seleção dos rolamentos adequados apresenta-se seguidamente, sendo que a figura 4.34 representa um diagrama de corpo livre das reações nos rolamentos. Note-se que estes rolamentos são adequados tanto para a fixação dos cachos de peças do tipo A como B, tendo-se, para o presente relatório, apenas utilizado os dados relativos ao cacho da série B por ser o de maior peso.

- Força exercida pelo peso do cacho:

$$m_1 = 1,53Kg \quad (4.1)$$

$$F_1 = m_1 \cdot g = 1,53 * 9,81 = 15N \quad (4.2)$$

- Força exercida pelos *grippers* para que ocorra a colagem:

$$F_2 = 40N \quad (4.3)$$

- Força exercida pelas peças na gitagem:

$$F = F_1 + F_2 = 55N \quad (4.4)$$

- Cálculo das reações nos rolamentos:

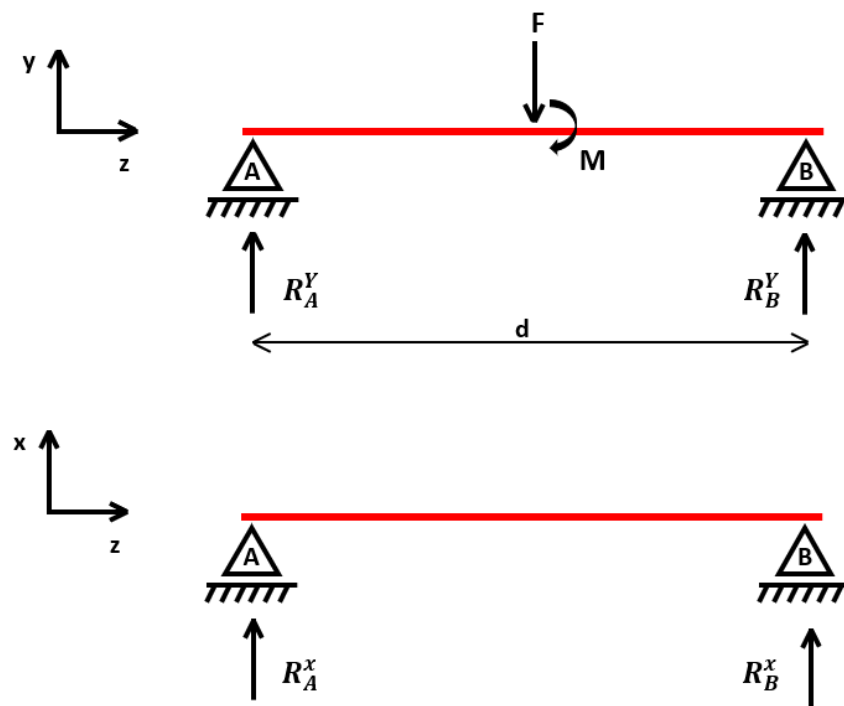


Figura 4.34: Reações dos rolamentos

$$\begin{cases} \Sigma F_y = 0 \\ \Sigma M_A = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_A^y + R_B^y - F = 0 \\ -\frac{d}{2} \cdot F + d \cdot R_B^y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_A^y = F - \frac{d}{2} \\ R_B^y = \frac{F}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_A^y = 27,5N \\ R_{By} = 27,5N \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma M_A = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_A^x + R_B^x = 0 \\ x \cdot R_B^x = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_A^x = 0 \\ R_B^x = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

- Cálculo da carga dinâmica equivalente do rolamento [40]:

$$\frac{Fa}{Fr} = 0 \Rightarrow P = Fr \Rightarrow P = 27,5N \quad (4.7)$$

- Cálculo da carga estática equivalente do rolamento [40]:

$$P_0 = 0,6 \cdot Fr \Rightarrow P_0 = 16,5N \Rightarrow P_0 < Fr \Rightarrow P_0 = Fr = 27,5N \quad (4.8)$$

- Fator de segurança (n=3):

$$P = 3 \cdot 27,5 \Rightarrow P_0 = 82,5N = 0,0825KN \quad (4.9)$$

$$P_0 = 3 \cdot 27,5 \Rightarrow P_0 = 82,5N = 0,0825KN \quad (4.10)$$

- Rolamentos escolhidos

Recorrendo ao catálogo de rolamentos de esferas da *SKF* [40] escolheram-se os rolamentos 61803, para o fixador de topo, e 61904, para a fixação da bacia, assinalados na figura 4.35, cujas cargas dinâmicas e estáticas reais são muito superiores aos valores obtidos pelas equações 4.9 e 4.10:

Dimensões principais			Classificações básicas de carga		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Massa	Designação
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade-limite		
mm			kN		kN	r/min		kg	—
17	26	5	2,03	1,27	0,054	56 000	34 000	0,0075	61803
	30	7	4,62	2,55	0,108	50 000	32 000	0,016	61903
	35	8	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 16003
	35	10	6,37	3,25	0,137	45 000	28 000	0,038	* 6003
20	32	7	4,03	2,32	0,104	45 000	28 000	0,018	61804
	37	9	6,37	3,65	0,156	43 000	26 000	0,037	61904
	42	8	7,28	4,05	0,173	38 000	24 000	0,05	* 16004
	42	12	9,95	5	0,212	38 000	24 000	0,067	* 6004

Figura 4.35: Rolamentos seleccionados [40]

O passo seguinte consistiu no cálculo da flecha máxima na gitagem, de forma a perceber se a pressão aplicada durante a colagem pode danificar o SGA. A figura 4.36 apresenta as dimensões da secção do SGA (à esquerda), bem como o diagrama de esforços (à direita).

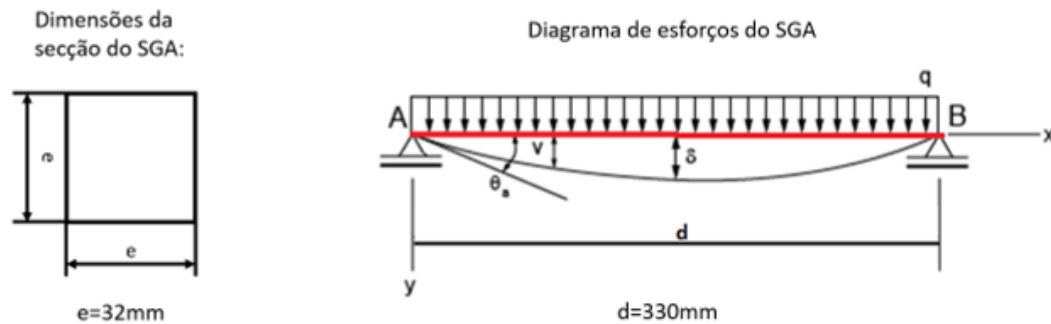


Figura 4.36: Dimensões da secção do SGA (esquerda) e diagrama de esforços (direita) [41]

- Dados necessários ao cálculo da flecha:

Módulo de *Young*: $E = 178 \text{ MPa}$ [42]

Largura: $e = 32 \text{ mm}$

Comprimento: $d = 330 \text{ mm}$

Carga distribuída: $q = 121 \text{ N/m}$

- Cálculo do valor do momento de inércia:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{32^4}{12} = 87,381 \cdot 10^3 \text{ mm}^4 = 87,381 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4 \quad (4.11)$$

- A flecha máxima encontra-se no centro do SGA e é obtido por [41]:

$$y = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot 121 \cdot 0,33^4}{384 \cdot 178 \cdot 10^6 \cdot 87,381 \cdot 10^{-9}} = 1,201 \text{ mm} \quad (4.12)$$

A flecha máxima obtida é de 1,201mm, valor que não se apresenta problemático para o caso de estudo. O máximo que poderá acontecer será o cacho final apresentar algumas distorções mínimas que não afetarão a qualidade das peças finais.

A figura 4.37 representa o conceito FR1 final e a figura 4.38 apresenta a solução em corte.

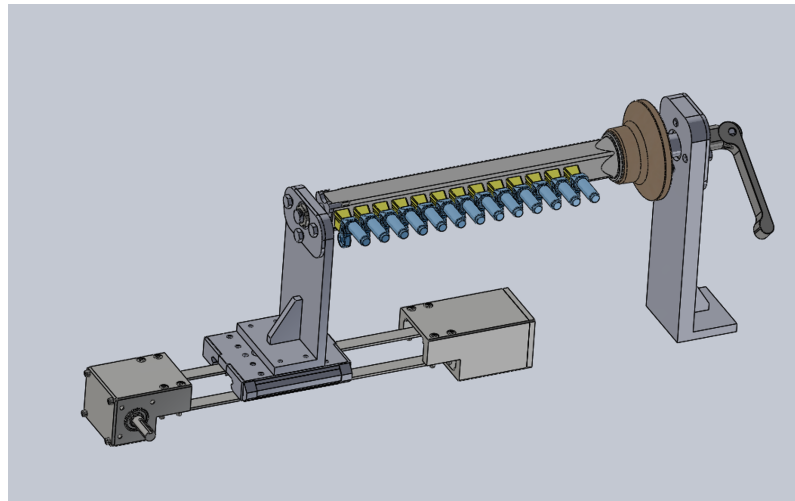


Figura 4.37: Conceito FR1

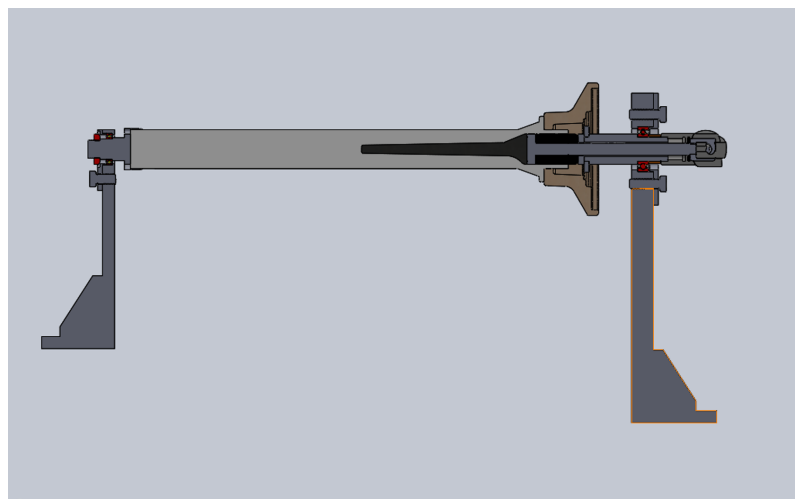


Figura 4.38: Vista em corte do conceito FR1

2. Conceito FR2: Casquilho com manípulo + ponteiras aquecidas

Neste conceito, a fixação do cacho pela bacia vai ser feita recorrendo ao mecanismo descrito na alínea anterior. No entanto, em vez de um fixador de topo, este conceito explora a possibilidade se serem aplicadas pontas aquecidas para a fixação da gitagem.

A fixação passa então a ser feita pela peça apresentada na figura 4.39. As ponteiras deverão estar aquecidas o suficiente para conseguirem perfurar superficialmente a cera, mas não

aquecidas ao ponto de derreterem em excesso o material. O suporte desta peça deverá estar montado numa guia linear.

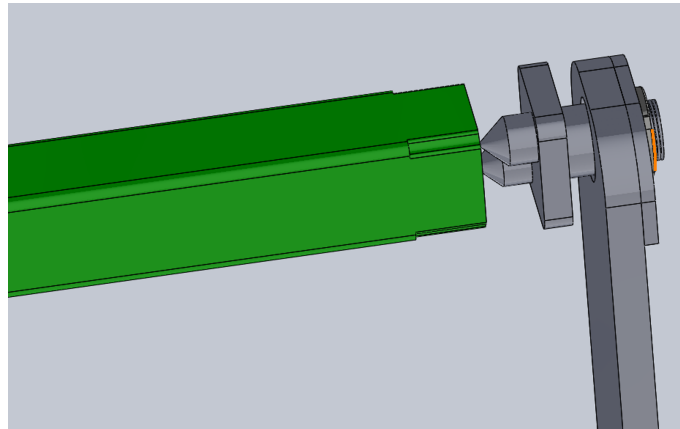


Figura 4.39: Ponteiros aquecidas

Tal como na solução anterior, o casquilho fixador da bacia roda livre, e o movimento de rotação encontra-se definido por um pequeno motor ligado à peça com as ponteiros.

3. Conceito FR3: Fixador de bacia + fixador de topo

Esta solução construtiva utiliza o mesmo fixador de topo do conceito FR1, sendo que a fixação da bacia já não é feita recorrendo ao casquilho com manípulo usado nas soluções anteriores. A fixação é, então, feita pelo interior da bacia recorrendo ao fixador da figura 4.40.

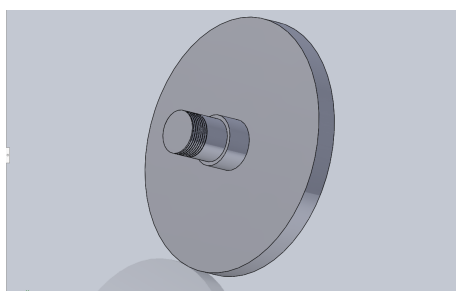


Figura 4.40: Fixador de bacia FR3

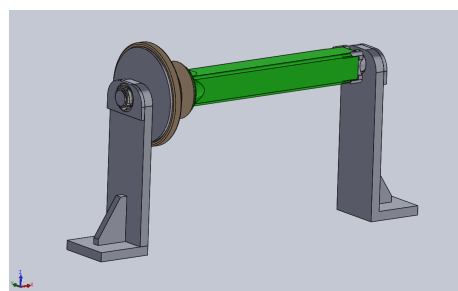


Figura 4.41: Conceito FR3

Esta solução conta com o atrito gerado na fricção da bacia com o fixador da mesma, como forma de garantir que estes rodam solidários.

Os suportes para estes dois componentes são iguais aos projetados para as outras duas soluções. A figura 4.41 apresenta um desenho desta solução.

4.4.2 Análise e seleção do conceito adequado

De forma a compreender qual o melhor conceito para o caso de estudo, elaborou-se uma matriz de decisão (ver tabela 4.8) na qual se avaliou quantitativa (escala 0-5) cada um deles, em diferentes parâmetros:

Tabela 4.8: Matriz de decisão para o sistema de fixação e rotação do SGA

Critérios de seleção	Conceitos		
	FR1	FR2	FR3
Sistema flexível para diferentes gitagens	3	5	3
Sistema flexível para os dois tipos de vazamento	5	5	3
Segurança	5	3	5
Robustez	4	3	4
Facilidade de fabricar	4	2	4
Rapidez no acoplamento da gitagem	3	2	4
Durabilidade	5	3	5
Pontuação Total	29	23	28

Como se pode ver, o conceito FR2, apesar de ser o mais versátil, adequado para qualquer geometria de gitagem e tamanho de bacia, é o que possui a pontuação mais baixa. Dado que a temperatura das pontas aquecidas é difícil de regular, poderia não ser possível definir uma temperatura exata, capaz de aquecer e fixar a superfície da gitagem, sem derreter a cera em demasia. Este processo exige eleva precisão dimensional pelo que não se pode correr o risco de o SGA não ficar bem fixo e paralelo às resistências durante a colagem.

Quanto ao conceito FR3, este poderia ser funcional caso não dependesse unicamente do atrito entre a bacia e o seu fixador para a rotação sincronizada do conjunto. Outro aspeto importante é a falta de versatilidade: conforme se utilizem diferentes bacias, diferentes fixadores vão ter de ser produzidos, revelando-se um custo acrescido.

Assim, o conceito selecionado para o sistema de fixação e rotação do SGA é o FR1. Apesar de ser relativamente mais demorado no acoplamento da gitagem e de não ser adequada para todas as geometrias, esta solução pode ser aplicada independentemente da bacia utilizada, sendo segura, robusta e fácil de fabricar. No caso de se pretender aplicar este conceito a outro tipo de SGA, basta trocar o fixador de topo por um que corresponda às novas exigências geométricas.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

O principal objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de um conceito que permitisse a colagem automática de modelos de cera nos respectivos sistemas de gragem e alimentação, recorrendo a braços robóticos.

O conceito idealizado apresenta-se na figura 5.1. Note-se que esta trata-se apenas de uma representação esquemática para mostrar um possível *layout* do sistema.

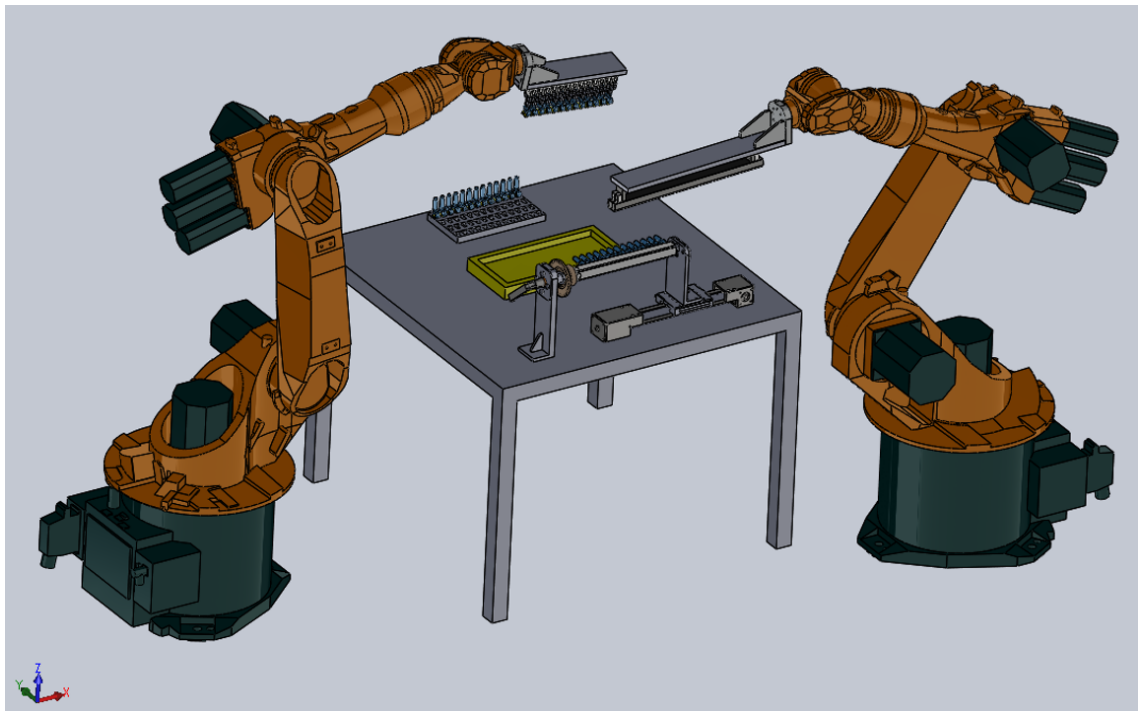


Figura 5.1: Proposta de conceito final

O reduzido tempo de elaboração do projeto não permitiu o desenvolvimento do conceito por completo, tendo-se optado por definir três subprojetos essenciais, os quais foram o sistema de

derretimento da gitagem, o sistema de manipulação das peças a colar e o sistema de fixação da gitagem. Todos os subprojetos foram elaborados com sucesso.

Ficou, também, definida a implementação de dois braços robóticos: um para o transporte e posicionamento das peças e outro para o manuseamento das resistências IV.

O trabalho experimental realizado permitiu concluir que:

Tanto a temperatura do ferro quente, como a temperatura da cera cola, influenciam a qualidade da junta de colagem. Para que se obtenha uma junta de qualidade superior, a temperatura da cera cola deverá estar compreendida entre 165 e 170°C. Relativamente à temperatura do ferro quente, uma vez que foi impossível estabilizar a mesma, nada se concluiu acerca do seu valor ótimo.

O derretimento da cera será feito por duas resistências infravermelhas, de quartzo-halogéneo (de onda curta), montadas em paralelo. Este método garante um derretimento rápido e uniforme da superfície da gitagem.

O tempo de incidência da radiação IV foi definido como sendo 2 segundos e tem de ser rigorosamente cumprido: se a radiação incidir durante um intervalo de tempo mais curto, a superfície da gitagem não derreterá o suficiente para ocorrer a colagem. Em contrapartida, tempo em demasia promove derretimento em excesso, sendo o arrefecimento e solidificação da junta demasiado prolongado, promovendo-se também a formação de pingos e outros defeitos.

Para além do derretimento da gitagem, é necessário aplicar cera cola no gito da peça a colar. Caso isto não aconteça, a junta não ficará forte o suficiente para aguentar as tensões de flexão causadas pelo banho cerâmico e consequente peso da carapaça cerâmica formada.

Após o derretimento da superfície da gitagem e da aplicação de cera cola no gito, existe um limite de tempo máximo para a colagem, caso contrário a cola seca e a cera da gitagem volta a solidificar. Para conhecer o tempo ideal realizaram-se ensaios para diferentes condições. Concluiu-se que o tempo ideal é cerca de 6 segundos.

Para avaliar a eficácia e viabilidade da utilização de radiação testou-se se a mesma não derreteria peças que estivessem coladas na face adjacente à de trabalho. Para controlar este efeito projetou-se um refletor de radiação, que faz com que estas apenas incidam na face pretendida.

Apesar da montagem da célula final não ter sido concretizada antes do término do período de realização desta dissertação, os resultados obtidos através dos testes realizados garantem:

- Juntas de colagem resistentes e uniformes, com bom acabamento
- Espaçamento entre peças constante e dimensionalmente exato
- Orientação e posicionamento precisos das peças
- Redução dos defeitos na colagem
- Versatilidade a nível da geometria da gitagem e das peças a colar

5.1 Trabalhos Futuros

No decorrer deste trabalho surgiram algumas ideias para complementar e melhorar o projeto atual, salientando-se as seguintes:

- No caso das gitagens mais compridas, é comum estas apresentarem-se empenadas como consequência da sua remoção dos moldes de injeção. Nestes casos, as peças não vão ficar bem coladas dado que a superfície do SGA não cumpre com o requisito de planeza. A solução para este problema passa por incluir uma pequena mola no topo de cada *gripper* para compensar a variação da distância entre a peça a colar e a gitagem.
- Criação de um reservatório de cera cola com resistência para a manter aquecida, e um sistema elétrico que mantenha a sua temperatura constante e abaixo dos 200°C (temperatura de ignição)
- Seleção de um atuador giratório que permita a rotação do SGA em 90°
- Inclusão de um robot para colocar peças no tabuleiro de disposição
- Inclusão de um robot para posicionar e retirar o SGA no gabari de fixação.

Referências

- [1] Adrian S Sabau e Srinath Viswanathan. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Materials Science and Engineering: A*, 362(1):125 – 134, 2003. Papers from the German Priority Programme (Functionally Graded Materials).
- [2] Bruce M. Phipps Raymond H. Puffer, Jr. Energy and waste minimization in the investment casting industry. páginas 4(s.d.):251–262.
- [3] Alexisnunez. How does a turbocharger waste gate works. <https://youramazingcar.com/how-a-turbocharger-waste-gate-works/>. Data de acesso: 2019-06-13.
- [4] Sarojrani Pattnaik, D. Benny Karunakar, e P.K. Jha. Developments in investment casting process—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11):2332 – 2348, 2012.
- [5] Investment Casting Institute. What is Investment Casting? - Investment Casting Institute | Montvale, NJ. <https://www.investmentcasting.org/what-is-investment-casting.html>. Data de acesso: 2019-03-26.
- [6] Luís Moreira. *Desenvolvimento da metodologia de fabrico de protótipos de torneiras pelo processo da cera perdida*. Tese de mestrado, FEUP, 2014.
- [7] José M. G. de Carvalho Ferreira. *Tecnologia da fundição*. Manuais universitários. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [8] João Gomes. *Desenvolvimento de um equipamento para soldadura automática de cera*. Tese de mestrado, FEUP, 2013.
- [9] Filipa Alexandra Martins Rocha. *Melhoria do processo de fundição por cera perdida de próteses de joelho em ligas CoCr*. Tese de mestrado, FEUP, 2017.
- [10] CIREX. Investment casting foundry: High grade steel components by using investment casting. <https://cirexfoundry.com/investment-casting/>. Data de acesso: 2019-06-2019.
- [11] ASM International. Handbook Committee, S. Lampman, C. Moosbrugger, E. DeGuire, e American Society for Metals. *ASM Handbook: Casting. Volume 15*. ASM Handbook. ASM International, 1998.
- [12] Review of investment casting wax. <http://www.ic-machines.com/review-investment-casting-wax.html>. Data de acesso: 04.03.2019.
- [13] Fábio J.B. Brum, Sandro C. Amico, Ivo Vedana, e Jaime A. Spim. Microwave dewaxing applied to the investment casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7):3166 – 3171, 2009.

- [14] João Dias Simas. *Fundição de turbinas em aluminetos de titânio*. Tese de mestrado, FEUP, 2015.
- [15] Grzeskowiak K, Dorota Czarnecka-Komorowska, e Sytek K. Influence of waxes remelting used in investment casting on their thermal properties and linear shrinkage. *Metalurgija -Sisak then Zagreb-*, 54:350–352, 02 2015.
- [16] Blayson Olefines Ltd. *Cost Reduction Through Wax Reclamation*. Blayson Olefines Ltd, 2009.
- [17] Valerio Faccenda. *Handbook on investment casting: the lost wax casting process for carat gold jewellery manufacture*. World Gold Council, 2003.
- [18] Modtech India. Modtech KAWAS - Automated Wax Assembly System. <https://www.youtube.com/watch?v=-EKCL5QL7Uw{&}t=90s>, 2015. Data de acesso: 2019-06-21.
- [19] Modtech India. Wax Pattern Assembly Automation . <https://www.youtube.com/watch?v=BCdnJ2zD3zs>, 2014. Data de acesso:2019-06-21.
- [20] Inc. MPI. 20-14 APAS (Automated Pattern Assembly System). <https://www.youtube.com/watch?v=rLL3l2OHS5g>, 2013. Data de acesso:2019-04-20.
- [21] Vulcan Engineering Co. Vulcan's investment casting capabilities. <https://www.youtube.com/watch?v=PfVG2t0SrMM&t=182s>, 2016. Data de acesso:2019-04-21.
- [22] Vulcan Engineering Co. Investment casting. <https://www.youtube.com/watch?v=0w62ZiwBn0A> note = Data de acesso:2019-04-21, 2013.
- [23] Baur Erwin Brinkmann Sigrid Oberbach Karl Osswald, Tim A. e Ernst Schmachtenberg. *International Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006.
- [24] INC. EXTOL. Spin welding. <https://www.extolinc.com/learning/spin-welding/>. Data de acesso: 2019-06-13.
- [25] Branson Ultrasonics. Spin welding demonstration. <https://www.youtube.com/watch?v=1GnGZp6pkXY>, 2011. Data de acesso: 2019-06-11.
- [26] Jeffrey Frantz. How to select a plastics assembly process. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-select-a-plastics-assembly-process>, 2013. Data de acesso: 2019-06-13.
- [27] PhD. Craig Freudenrich. How ultrasonic welding works. <https://science.howstuffworks.com/ultrasonic-welding1.htm>, 2011. Data de acesso: 2019-06-13.
- [28] Emerson Elettric Co. Laser plastic welding. <https://www.emerson.com/en-us/automation/welding-assembly-cleaning/laser-welding>, 2009. Data de acesso:2019-06-13.
- [29] Panasonic Electric Works. Laser welding technology. <https://laser.panasonic.eu/en/laser-welding-systems/technology.htm>, 2014. Data de acesso: 2019-06-05.

- [30] Foward Technology. About infrared welding. <http://www.forwardtech.com/plastic-assembly/infrared-welders/about-infrared-welding>. Data de acesso: 2019-06-15.
- [31] FEIPLAR COMPOSITES & FEIPUR. Aquecimento por radiação infravermelha e correta especificação dos emissores de infravermelho. <https://www.youtube.com/watch?v=FqkGsICfVqU>, 2016. Data de acesso: 2019-06-15.
- [32] Photo Electronics SRL. Infrared heating principles: The correct wavelength. <https://www.photoelcuring.com/en/technologies/ir-halogen/>. Data de acesso: 2019-06-15.
- [33] LPKF Laser & Eletronics. Hybrid laser welding process. <https://www.laserplasticwelding.com/hybrid-laser-welding-process>. Data de acesso: 2019-06-13.
- [34] Forsstrom High Frequency AB. What is hf/rf welding? <https://www.forsstrom.com/en/hf-technology/what-is-hf-rf-welding/>. Data de acesso: 2019-06-13.
- [35] Aquaflame Systems. Investment casting wax assembly clean up. https://www.youtube.com/watch?v=dgi4rx6h_5g. Data de acesso: 2019-06-15.
- [36] Aquaflame Systems. Aquaflame for wax assembly in investment casting. <https://www.aquaflamesystems.com/uses/investment-casting-wax/>. Data de acesso: 2019-05-20.
- [37] Heraeus. Infrared Emitters for Industrial Processes. https://apps.heraeus.com/IR{_}Products{_}EN/mobile/index.html{#}p=4. Data de acesso: 2019-06-15.
- [38] Ceramicx Resitec. *Resistências de infravermelhos- catálogo de produto*. 2017.
- [39] Resitec. Resistências de infravermelhos. <https://docplayer.com.br/5834227-2-resistencias-de-infravermelhos.html>. Data de acesso: 2019-06-15.
- [40] SKF. *Rolling bearings Rolamentos de esferas*. 2015.
- [41] Andressa Eulálio Lages. Cálculo de flecha em viga pelo método da linha elástica - Guia da Engenharia. <https://www.guiadaengenharia.com/flecha-viga-linha-elastica/>. Data de acesso: 2019-07-09.
- [42] Paulina Wawulska-Marek, R Sitek, T Bolek, J Zdunek, e K.J. Kurzydłowski. *A Study on Technological Properties of Investment Casting Waxes*. 2015.