

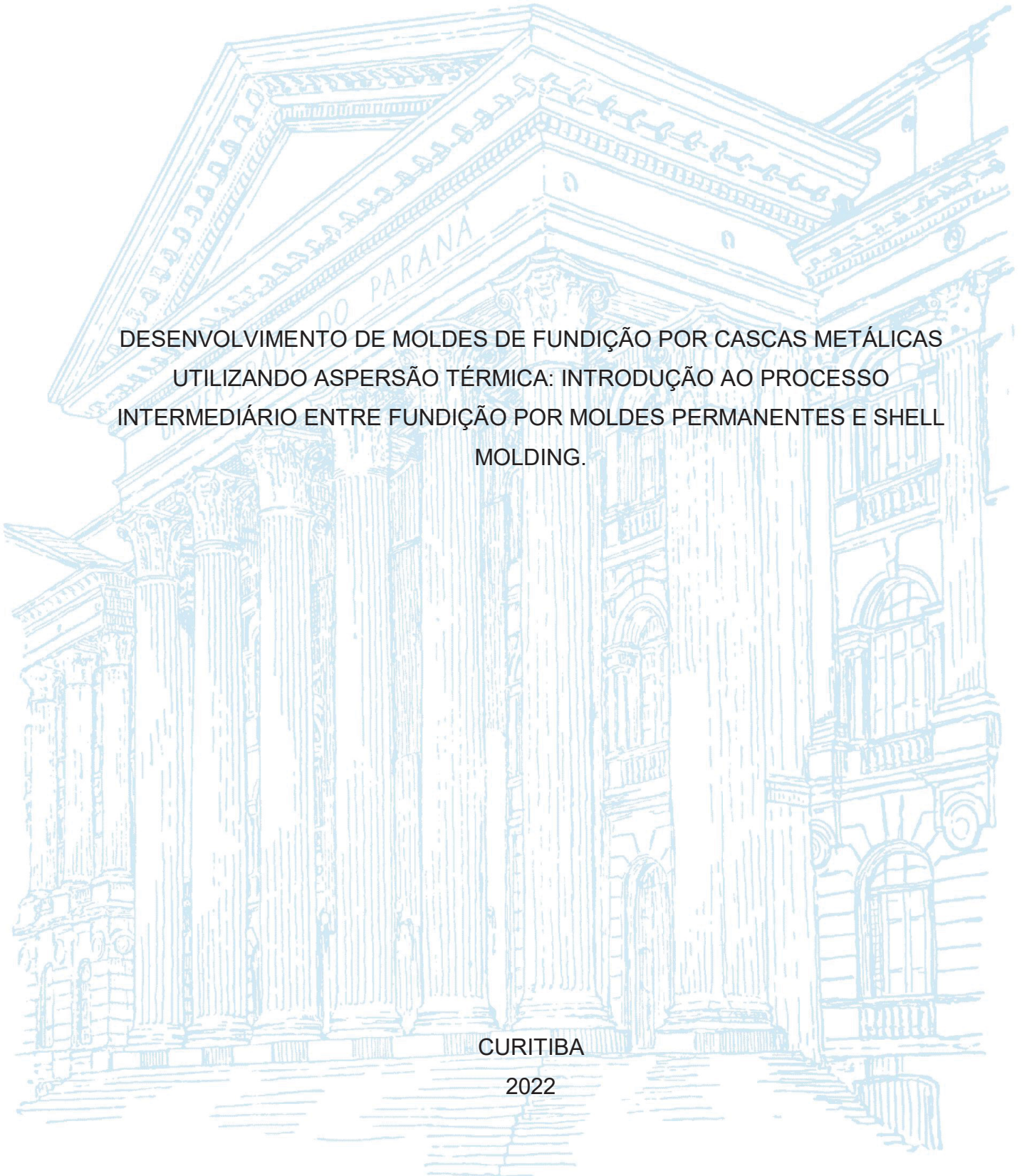
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO VIEIRA LIZAMA

DESENVOLVIMENTO DE MOLDES DE FUNDIÇÃO POR CASCAS METÁLICAS
UTILIZANDO ASPERSÃO TÉRMICA: INTRODUÇÃO AO PROCESSO
INTERMEDIÁRIO ENTRE FUNDIÇÃO POR MOLDES PERMANENTES E SHELL
MOLDING.

CURITIBA

2022



RODRIGO VIEIRA LIZAMA

DESENVOLVIMENTO DE MOLDES DE FUNDIÇÃO POR CASCAS METÁLICAS
UTILIZANDO ASPERSÃO TÉRMICA: INTRODUÇÃO AO PROCESSO
INTERMEDIÁRIO ENTRE FUNDIÇÃO POR MOLDES PERMANENTES E SHELL
MOLDING.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortes Paredes

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Lizama, Rodrigo Vieira.

Desenvolvimento de moldes de fundição por cascas metálicas utilizando aspensão térmica : introdução ao processo intermediário entre fundição por moldes permanentes e *shell molding*. / Rodrigo Vieira Lizama. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. Orientador: Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes.

1. Fundição. 2. Aspensão térmica. 3. Ferro fundido. 4. Moldagem (Fundição). I. Cortés Paredes, Ramón Sigifredo. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RODRIGO VIEIRA LIZAMA** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE FUNDIÇÃO UTILIZANDO ASPERSÃO TÉRMICA: INTRODUÇÃO AO PROCESSO INTERMEDIÁRIO ENTRE FUNDIÇÃO POR MOLDES PERMANENTES E SHELL MOLDING**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 23 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica
14/10/2022 17:43:27.0
RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
16/10/2022 19:35:50.0
GUSTAVO BAVARESCO SUCHARSKI
Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O
DESENVOLVIMENTO)

Assinatura Eletrônica
17/10/2022 09:59:59.0
SERGIO FERNANDO LAJARIN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
14/10/2022 14:42:33.0
HELIO PADILHA
Avaliador Externo (DEPARTAMENTO DE ENG. MECÂNICA UFPR)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pela oportunidade de participar do programa de Pós-graduação como seu orientado e pelo acompanhamento do meu trabalho.

Ao meu colega e grande amigo Pedro Polato Bites da Costa, por toda ajuda com os experimentos e processos de medição.

A minha namorada Renata pelo apoio e compreensão.

Aos meus pais, meus heróis, diretos responsáveis por todas as minhas conquistas pessoais e profissionais.

A Deus, que me guiou em todo momento.

RESUMO

No processo de fundição por moldes permanentes, o material utilizado na fabricação dos moldes varia de acordo com o material a ser fundido, sendo os materiais mais comuns para sua fabricação o ferro fundido, aço ao carbono, ligas de Cu e Cr, entre outros. Para a fabricação do molde, além do custo com o material, também deve ser considerado o alto custo de usinagem, que varia de acordo com a geometria das peças a serem fundidas. Um processo de fundição que utiliza moldes permanentes possui em seu leque de vantagens, a durabilidade do molde, tendo a capacidade de produzir milhares de peças sem a necessidade de manutenção. Em contrapartida ao processo de fundição por moldes permanentes, o processo de fundição conhecido por *Shell Molding* tem a característica de descartabilidade. Este trabalho tem o objetivo de demonstrar viabilidade técnica para o desenvolvimento de uma tecnologia de processo de fundição mesclando moldes permanentes e moldes *Shell Molding*, visando à obtenção um molde tipo casca metálica, de menor custo, durável e com produto de fundição de tolerâncias dimensionais precisas. O desenvolvimento de um molde permanente tipo casca se faz possível com a utilização do processo de aspersão térmica, aplicando uma camada superficial em um modelo com a geometria da peça a ser fundida, fabricando assim, um molde casca de fundição. Um modelo de alumínio usinado, com aplicação de desmoldante, foi revestido com aço inoxidável 304L e alumínio ER4043. O desmoldante tem a função de facilitar a retirada do revestimento do modelo para a obtenção da casca. O processo de aspersão térmica utilizado foi o de arco elétrico utilizando arames de 1,6 mm de diâmetro. O trabalho apresenta a análise da casca gerada, avaliando espessura, rugosidade e dureza superficial interna. Os experimentos de deposição de aço 304L e alumínio ER4043 fabricaram cascas metálicas demonstrando a viabilidade técnica para o desenvolvimento do processo intermediário de fundição entre moldes permanentes e fundição por casca.

Palavras-chave: Fundição, Aspersão Térmica, Molde Permanente, Shell Molding.

ABSTRACT

In the permanent die casting process, the material used to manufacturing the die changes according to the material that will be casted, the most common materials that are used in the die manufacturing are cast iron, steel alloys, Cu and Cr alloys and others. To manufacturing the die, besides the cost with material, also must be considered the high cost of machining that changes according with the geometry of the component to be casted. An casting process using permanent die has in his multiple vantages, die's durability, being capable to produce thousands of parts without the need of maintenance. In opposite with the permanent die casting process, the casting process known as Shell Molding has characteristics of disposability. This research has the objective of demonstrate the technical feasibility for the development of a casting process technology mixing permanent die and Shell Molding die, obtaining a lower cost metallic shell type die, with durability and with a casting product with precise dimensional tolerances. The development of a shell type permanent die is possible using the thermal spray process, applying a superficial coating in a model with a geometry of a part to be casted, manufacturing un casting shell mold. A machined aluminum model with application of a release agent was coated with stainless steel 304L and aluminum ER4043. The release agent has the function of make easily the extraction of the coating from the model to obtain the shell. Electric arc thermal spraying process was used, utilizing wires with 1,6 mm of diameter. The research presents the analyses of the generated shell, evaluating thickness, roughness and hardness of the intern surface. The deposition experiments of steel 304L and aluminum ER4043 manufactured metallic shells demonstrating the technical feasibility for the development of an intermediary casting process between permanent mold and shell molding.

Keywords: Casting Process, Thermal Spray, Permanent Die Casting Process, Shell Molding.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CASCA ...	22
FIGURA 2 - MOLDE CASCA	23
FIGURA 3 - SISTEMAS DE TRANSPORTE DE METAL FUNDIDO PARA CAVIDADE DO MOLDE	25
FIGURA 4 - ESBOÇO DO SISTEMA COM INCLINAÇÃO CONTROLADA	26
FIGURA 5 - MOLDE PERMANENTE DE FECHAMENTO MANUAL	28
FIGURA 6 - ESQUEMA DE ASPERSÃO TÉRMICA	32
FIGURA 7 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	34
FIGURA 8 - VELOCIDADE MÉDIA DE IMPACTO DAS PARTÍCULAS CONFORME OS PROCESSOS	34
FIGURA 9 - HISTÓRIA E CRESCIMENTO DA INDÚSTRIA DE ASPERSÃO TÉRMICA	34
FIGURA 10 - COMPONENTES DE INSTALAÇÃO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO	36
FIGURA 11 - ESQUEMA DO PROCESSO A ARCO ELÉTRICO	37
FIGURA 12 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO	37
FIGURA 13 - ASPERSÃO ARCO ELÉTRICO OFIC	38
FIGURA 14 - TESTE DE DOBRA	41
FIGURA 15 - ESQUEMA TESTE DE ADESÃO	42
FIGURA 16 - MICROGRÁFIA DE A) SUPERFÍCIE 300X E B) SEÇÃO TRANSVERSAL DO REVESTIMENTO 30X	43
FIGURA 17 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DE RA	49
FIGURA 18 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO EXEMPLIFICADO A MEDIÇÃO DE RY E RZ	50
FIGURA 19 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO SULZER METCO VALUARC	54
FIGURA 20 - FONTE DE ASPERSÃO METALLISATION S250(16)-PLC	55
FIGURA 21 - PISTOLA DE ASPERSÃO METALLISATION ARC140	55
FIGURA 22 - ALIMENTADOR ARAMES DE ASPERSÃO METALLISATION	56
FIGURA 23 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO METALLISATION	56
FIGURA 24 - MODELO EM ALUMÍNIO	57
FIGURA 25 - MODELO 3D PARA FABRICAÇÃO EM TORNO MANUAL	57
FIGURA 26 - DESMOLDANTE CLARUS 6400	58

FIGURA 27 - MODELO DE ALUMÍNIO COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE	60
FIGURA 28 - DETECTOR DE RUGOSÍMETRO MITUTOYO NO.178-296	61
FIGURA 29 - CASCA DE AÇO 304L GERADA COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE.....	62
FIGURA 30 - CASCA DE AÇO 304L GERADA SEM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE.....	63
FIGURA 31 - CASCA DE ALUMÍNIO ER4043 GERADA COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE.....	64
FIGURA 32 - CASCA DE ALUMÍNIO ER4043 GERADA SEM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE.....	65
FIGURA 33 - A) ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NO MODELO DE ALUMÍNIO. B) MODELO COM APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO .	66
FIGURA 34 - CASCA DE ALUMÍNIO GERADA NO EQUIPAMENTO METALLISATION APÓS EXTRAÇÃO DO MODELO	66
FIGURA 35 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE AÇO 304L	67
FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURAS DA CASCA DE 304L NO MODELO DE ALUMÍNIO	68
FIGURA 37 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE ALUMÍNIO.....	69
FIGURA 38 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE ALUMÍNIO CORTADA	69
FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURAS DA CASCA DE ER4043 NO MODELO DE ALUMÍNIO	71
FIGURA 40 - REGIÃO ESCOLHIDA PARA ANÁLISE DE COPIA DE SUPERFÍCIE	72
FIGURA 41 - A) REGIÃO PARA ANÁLISE INDICADA NA FIGURA 35 ZOOM 6,3X; B) REGIÃO ESPELHO NA CASCA DE ALUMÍNIO	72
FIGURA 42 - A) REGIÃO PARA ANÁLISE INDICADA NA FIGURA 35 ZOOM 200X; B) REGIÃO ESPELHO NA CASCA DE ALUMÍNIO	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES DO MOLDE DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CASCA.	23
TABELA 2 - PROPRIEDADES DE UM MOLDE PERMANENTE FABRICADO COM AÇO LIGA H13	28
TABELA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS	29
TABELA 4 - RUGOSIDADES SUPERFICIAIS DE PRODUTOS DE FUNDIÇÃO	30
TABELA 5 - TEMPERATURAS DAS FONTES DE CALOR ADAPTADO, (ASM, 1994)	34
TABELA 6 - ESPECIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA REVESTIMENTO E DO SUBSTRATO DE AÇO.....	40
TABELA 7 - PARÂMETROS DO PROCESSO POR ARCO ELÉTRICO PARA O EXPERIMENTO COM ALUMÍNIO 99,5%.....	40
TABELA 8 - PARÂMETROS VARIÁVEIS DO REVESTIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 99,5%.....	41
TABELA 9 - TESTE DE ADESÃO E DE DOBRA	42
TABELA 10 - OS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE CONTROLE DOS PROCESSOS DE AT	44
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE PROCESSOS DE AT	45
TABELA 12 - VANTAGENS RELACIONADAS AOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA.....	47
TABELA 13 - DESVANTAGENS RELACIONADAS AOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	47
TABELA 14 - VALORES DE RA PARA COMPRIMENTOS MÍNIMOS DE AMOSTRAGEM (ABNT NBR 6405)	50
TABELA 15 - PARÂMETROS DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO PARA OS EXPERIMENTOS COM O MODELO USINADO DE ALUMÍNIO.....	53
TABELA 16 - ESPECIFICAÇÃO FONTE LCARE VALUARC	54
TABELA 17 - ESPECIFICAÇÃO FONTE S250(16)-PLC.....	55
TABELA 18 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE AÇO AISI304L	58
TABELA 19 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE ALUMÍNIO ER 4043.....	59

TABELA 20 - ESPESSURAS MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L.....	67
TABELA 21 - ESPESSURAS MEDIDAS DA CASCA DE ALUMÍNIO	70
TABELA 22 - RUGOSIDADES MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L	74
TABELA 23 - DUREZAS MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L.....	75
TABELA 24 - DUREZAS MEDIDAS DA CASCA DE ALUMÍNIO	75
TABELA 25 - ESTIMATIVA DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO MESCLADO EM DESENVOLVIMENTO	76

Lista de abreviaturas OU siglas

ABNT	- Associação brasileira de normas técnicas
NBR	- Norma técnica brasileira
OFIC	- Osaka fuji corporation
ISO	- International organization for standardization/Organização internacional de normalização
AT	- Aspersão térmica
ASM	- American society for metals/Associação americana para metais
RMS	- Média quadrática
ABS	- Acrilonitrila butadieno estireno
PLA	- Ácido polilático
FS	- Flame spray/Chama spray
ASP	- Arc spray process/Processo arco spray

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 HIPÓTESES	16
1.5 OBJETIVOS.....	16
1.5.1 Objetivos específicos	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 FUNDIÇÃO	18
2.1.1 Apresentação	18
2.1.2 Desmoldantes de fundição	19
2.1.3 Processos de fundição	20
2.1.4 Processo de fundição por casca (<i>Shell Molding</i>)	21
2.1.4.1 Processo de fundição de investimento, avanços em tecnologia em casca ...	24
2.1.5 Fundição por molde permanente, ou por gravidade	24
2.1.6 Comparação entre processos	28
2.2 ASPERSÃO TÉRMICA	30
2.2.1 Processos de aspersão térmica	33
2.2.1.1 Aspersão térmica por arco elétrico - ASP	35
2.2.1.1.1 Aspersão térmica por arco elétrico de alumínio	39
2.2.2 Comparação entre processos	44
2.2.3 Preparação da superfície	47
2.2.4 Limpeza	48
2.2.5 Rugosidade da superfície.....	49
2.2.6 Pré-aquecimento do substrato	51
3 MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1 ASPERSÃO EM MODELO FABRICADO COM PROCESSO DE USINAGEM ...	56
3.2 MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CASCA.....	60
3.3 CAPACIDADE DE CÓPIA DA SUPERFÍCIE DO MODELO E MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL INTERNA	60
3.4 MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL INTERNA	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM 304L COM DESMOLDANTE.....	62
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM 304L SEM DESMOLDANTE	63
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 COM DESMOLDANTE	63
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 SEM DESMOLDANTE.....	64
4.5 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 COM DESMOLDANTE EM APLICAÇÃO COM EQUIPAMENTO METALLISATION	65
4.6 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CASCA.....	66
4.7 CAPACIDADE DE CÓPIA DA SUPERFÍCIE DO MODELO	71
4.8 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL INTERNA ...	73
4.9 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL INTERNA	74
4.10 ESTIMATIVA DE CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO PROPOSTO	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS	80
ANPÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO PARA FABRICAÇÃO DO MODELO USINADO DE ALUMÍNIO	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde o descobrimento da siderurgia, séculos atrás, diversos métodos e aprimoramentos foram sendo estudados. Hoje a indústria conta com uma extensa gama de aços e processos de fundição de alta qualidade e com custos cada vez menores. Quando se discute processos de fundição, existem diferentes tipos de processos: areia verde, *shell molding*, cera perdida, moldes permanentes (tipo coquilha e por pressão) e outros. Cada processo possui vantagens e desvantagens de acordo com o material e a geometria do componente a ser fundido.

Os processos de fundição que utilizam moldes permanentes são fundição por gravidade, fundição sob pressão e por centrifugação. Por gravidade, o metal líquido é aplicado ao molde onde é preenchido apenas sob o efeito da gravidade. Já no processo de fundição sob pressão, o metal líquido é aplicado por uma injetora sob alta pressão. O preenchimento do molde pelo metal líquido no processo de fundição por centrifugação acontece primeiramente pela gravidade, e depois, pela aplicação de rotação no molde. Os três processos possuem em comum o uso de moldes metálicos robustos e de alto custo.

O processo *shell molding*, ou fundição em casca, utiliza um molde tipo casca preparado com areia e resina que com a aplicação de calor, adere a um molde, fabricando uma casca de fundição.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para a revisão bibliográfica e o completo raciocínio quanto aos processos de fundição, de acordo com a literatura existente para o assunto, será adotado o conceito de processo de fundição por molde permanente e por gravidade como sendo o mesmo processo. O processo de fundição por molde permanente, ou por gravidade, utilizam moldes robustos, maciços e que são fabricados em ferro fundido, aço ao carbono com adição de tratamento térmico, ligas de cobre (Cu) e cromo (Cr) ou outras ligas nobres. As dimensões e a complexibilidade de um molde são diretamente proporcionais ao tamanho e a geometria da peça a ser fabricada. Um

molde permanente é convencionalmente maciço e variando sua dimensão e geometria, possui elevado custo de fabricação.

No processo de fundição em casca, também se tem alta produtividade, porém com um menor custo de confecção do molde em relação aos moldes permanentes. A tecnologia de fundição em casca possui a característica de descartabilidade após a produção de um lote peças.

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando a possibilidade de desenvolvimento de uma tecnologia de fundição que resolva o problema de custo para a fabricação de molde permanente e que seja reutilizável, em comparação á fundição em casca, torna-se necessário o desenvolvimento de um estudo. Um processo de fundição que combine os processos que utilizam moldes permanentes e fundição em casca teria a vantagem de ser mais competitivo, devido à possibilidade do alto desempenho de produção e de um custo relativamente menor para a produção, quando comparado aos moldes permanentes.

1.4 HIPÓTESES

Utilizando a tecnologia de aspersão térmica, existe a possibilidade de desenvolver um método de fabricação de uma casca metálica, revestindo um modelo metálico com um revestimento espesso. Em contrapartida a característica geralmente desejável, de alta adesão, em processos de aspersão térmica, para que seja possível a extração da casca, é necessário que tenha pouca aderência.

1.5 OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica para o desenvolvimento de uma tecnologia de processo de fundição mesclando moldes permanentes e moldes de fundição em casca. O desenvolvimento de um molde permanente tipo casca se faz possível com a utilização do processo de aspersão térmica, aplicando uma camada superficial de materiais de elevada resistência mecânica em um modelo metálico. A tecnologia de aspersão térmica por arco

elétrico utilizando arames de aço 304L e alumínio ER4043 foi à utilizada para os experimentos de fabricação de cascas.

1.5.1 Objetivos específicos

- Após a aplicação de revestimento, extrair a casca metálica do modelo sem romper e danificar a geometria;
- Verificar a viabilidade de aplicação de desmoldante para facilitar a extração de revestimentos;
- Analisar os revestimentos e verificar as espessuras mínimas para a fabricação de casca;
- Verificar a capacidade da casca de copiar detalhes da superfície do modelo e gerar análise quantitativa relacionando com medição de rugosidade interna da casca;
- Obtenção de uma rugosidade superficial interna da casca similar a de uma superfície de um molde de fundição;
- Realizar medição de dureza da superfície interna da casca e comparar com a dureza de moldes permanentes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o melhor entendimento das tecnologias e das ideias propostas, se faz necessário uma revisão bibliográfica de fundição e dos processos por molde permanente e por molde em casca. Também será apresentada revisão da tecnologia de aspersão térmica e o processo adotado para os experimentos, aspersão térmica por arco elétrico. A revisão apresenta também, tópicos específicos como desmoldantes e aspersão térmica de alumínio, assuntos de muita importância para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 FUNDIÇÃO

Este capítulo tem objetivo de apresentar o processo de fundição, de forma generalista, com aprofundamento apenas nos processos no qual esta pesquisa se desenvolve.

2.1.1 Apresentação

A fundição é um processo de fabricação onde um metal totalmente fundido é derramado na cavidade de um molde que possui a forma desejada. Com a solidificação, o metal assume a forma do molde, porém sofre contração. As técnicas de fundição são empregadas quando a forma acabada é tão grande ou complicada que qualquer outro método seria impraticável. Além disso, também se aplica para casos em que uma liga específica possui uma ductilidade tão baixa que a conformação por trabalho a quente ou a frio seria difícil. Ademais, esse processo também é vantajoso quando a fundição é o processo de maior viabilidade econômica. Além disso, a etapa final no refino, até mesmo de metais dúcteis, pode envolver um processo de fundição. Uma variedade de técnicas de fundição é comumente empregada, incluindo a fundição em molde de areia, com matriz, de revestimento ou precisão, com cera perdida e a fundição contínua.

Uma característica de destaque em processos de fundição é a aplicação de desmoldante no molde, para facilitar a extração dos componentes fundidos.

Desmoldantes afetam a qualidade das peças fundidas, a vida útil dos moldes e o tamanho dos ciclos de fundição. Desmoldantes devem ter compatibilidade com o

material a ser fundido e devem atender vários requisitos em termos de eficiência econômica e compatibilidade ambiental (NUERNBERGMESSE, 2020).

Rugosidade superficial pode ter grande efeito em propriedades mecânicas incluindo resistência a fadiga assim como a resolução geométrica de peças fundidas (SNELLING et. al., 2019).

2.1.2 Desmoldantes de fundição

Os desmoldantes mais utilizados a base de água, que formam um filme entre o molde de fundição e o material a ser fundido durante o processo e o resfriamento do molde, que possui elevada temperatura na superfície após a finalização do processo. Durante longos ciclos com temperatura elevada (em torno de 500 °C), considerando o alumínio, por exemplo, existe severo desgaste no molde. Portanto, o desmoldante acaba protegendo os moldes de fundição. Em muitos casos de aplicação de desmoldantes, cera e emulsivos de água são aplicados em spray na superfície do molde. Durante o processo de fundição, a água evapora, resfriando o molde, e a parafina permanece na superfície do molde gerando um filme de separação. Isso facilita a remoção da peça fundida do molde (NUERNBERGMESSE, 2020).

Em fundição é consenso que a microestrutura de ligas solidificadas depende da taxa de solidificação. Em processos de fundição por molde permanente ou por gravidade, a retirada de calor da liga fundida passa por uma camada de liga solidificada, a interface molde-fundido, e então, para o molde. Com um molde metálico, a perda de calor é usualmente limitada pelas propriedades da interface molde-fundido, a qual é caracterizada pela rugosidade das superfícies de contato e das propriedades da camada de desmoldante (HAMASAIID et. al., 2019).

Os desmoldantes usados em processos de fundição por molde permanente usualmente possuem uma grande espessura de 50 a 150 µm. Esses desmoldantes mantêm integridade mecânica e evitam qualquer solidificação prematura, promovendo o completo preenchimento da cavidade do molde, podendo ser usados para controlar a taxa de solidificação. Ainda mais, o desmoldante protege o molde de choques térmicos do metal fundido e evita incrustação no molde. Regiões do molde onde uma taxa de solidificação lenta é necessária, como no alimentador, usualmente tem uma camada mais espessa que as peças que necessitam de uma

taxa de solidificação deve ser rápida. Quando uma taxa de solidificação mais rápida é requerida, o desmoldante é alterado de cerâmica para grafite. Estas características do desmoldante necessitam de baixa condutividade térmica, para controle da transferência de calor do fundido para o molde, e de uma boa estabilidade química, para evitar reação química com o metal fundido. O desmoldante do molde é uma barreira térmica que atua com um grande papel na limitação da retirada de calor durante a solidificação do fundido (HAMASAIID et. al., 2019).

Além das habilidades de extração e resfriamento, os agentes desmoldantes devem possuir outras propriedades, como uma boa umectação, estabilidade química em altas temperaturas, compatibilidade ambiental e a habilidade de não entupir os canais do sistema de spray e o espaço entre as partes móveis do molde. Desmoldantes diluíveis em água contém aditivos que causam às matérias prima orgânicas, a formação de uma mistura estável na fase aquosa, que protegem o molde contra a corrosão. Agentes desmoldantes também devem atender a demanda por eficiência de recursos, para que, a cada ciclo de fundição, apenas pequenas quantidades sejam necessárias e as perdas sejam mínimas (NUERNBERGMESSE, 2020).

O entendimento da interação entre desmoldantes, moldes de fundição e produtos fundidos é de extrema importância para o desenvolvimento da pesquisa de fabricação de cascas de fundição, considerando que a casca tem o comportamento do material fundido, e o modelo aspergido se comporta como o molde. A característica de aumento da facilidade de remoção de peças fundidas com aplicação de desmoldantes a base de água foi considerada para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1.3 Processos de fundição

Atualmente, a indústria possui uma gama de processos de fundição com diferentes características, a revisão bibliográfica para a pesquisa em questão aborda apenas os processos de fundição por molde permanente e *shell molding*. Os processos de fundição com grande aplicação no mercado e que não serão detalhados nesta revisão são:

- Fundição em areia verde;
- Fundição por cera perdida;

- Fundição sob pressão;
- Fundição por centrifugação.

2.1.4 Processo de fundição por casca (*shell molding*)

As desvantagens do processo em areia verde levaram os engenheiros a desenvolverem novos tipos de moldes, sendo que o uso das resinas foi um grande aperfeiçoamento na utilização de areia para a produção de moldes de fundição (MORO e AURAS, 2007).

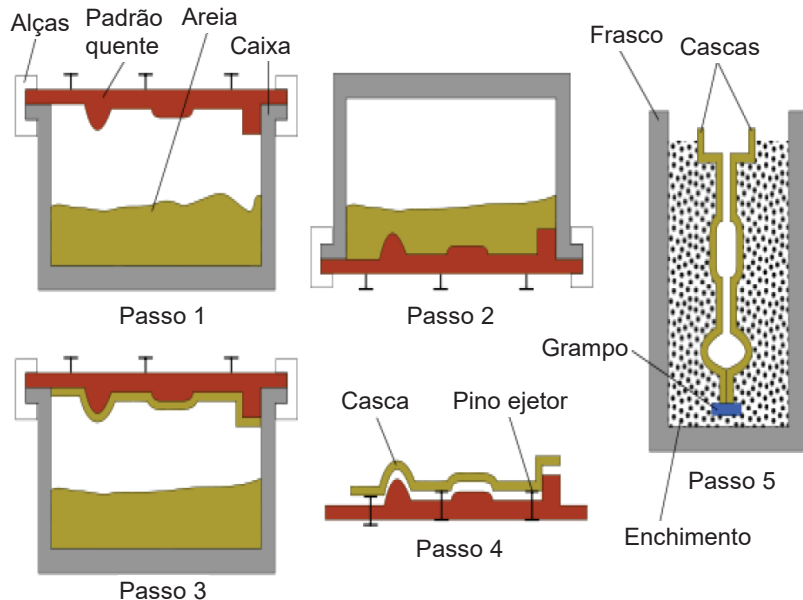
A areia não precisa mais ser compactada, pois o aglomerante, que é como uma espécie de cola, tem a função de manter juntos os grãos de areia (MORO e AURAS, 2007). A cura (secagem) pode ser a quente ou a frio. A cura a frio é mais cara e utiliza substâncias ácidas e corrosivas como os catalisadores de reação química, exigindo muito cuidado na manipulação uma vez que são tóxicas. Por estas desvantagens é pouco utilizada. A cura a quente é chamada de "*shell molding*" (moldagem em casca). As resinas empregadas são normalmente do tipo poliéster, uréia formaldeído ou fenolformaldeído. A resina é constituída de 3 a 10% do molde, sendo o restante constituído de areia-base, que deve ser fina e isenta de impurezas.

O processo de fabricação do molde casca, segundo Iqbal, Vidyarthee e Patel consiste em 6 etapas:

1. A areia de sílica fina é coberta por uma fina (3 ~ 6%) resina fenólica termofixa e líquido catalisador, que é despejado, soprado ou injetado em um padrão quente. O padrão é usualmente fabricado em ferro fundido e aquecido de 230 a 315 °C. A areia é deixada no padrão por alguns minutos para permitir a parcial cura da areia;
2. O padrão e a areia são invertidos, e então o excesso de areia é retirado do padrão, sobrando apenas a casca. Dependendo do tempo e da temperatura do padrão, a espessura da casca varia de 10 a 20 mm;
3. O padrão e a casca juntos são colocados no forno para finalizar a cura da areia. A casca neste momento tem resistência a tração de 2,4 a 3,1 MPa;
4. A casca endurecida é deslocada do padrão;
5. Duas ou mais cascas são combinadas por grampos ou colas usando um termo adesivo para formação do molde. O molde finalizado pode então ser usado imediatamente ou armazenado indefinidamente;

Para o processo de fundição, o molde casca é colocado dentro de uma caixa cercada de areia e cascalho para reforçar a casca. A Figura 1 mostra em etapas o processo de fundição por casca.

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CASCA



Fonte: IQBAL ET. AL. (2014).

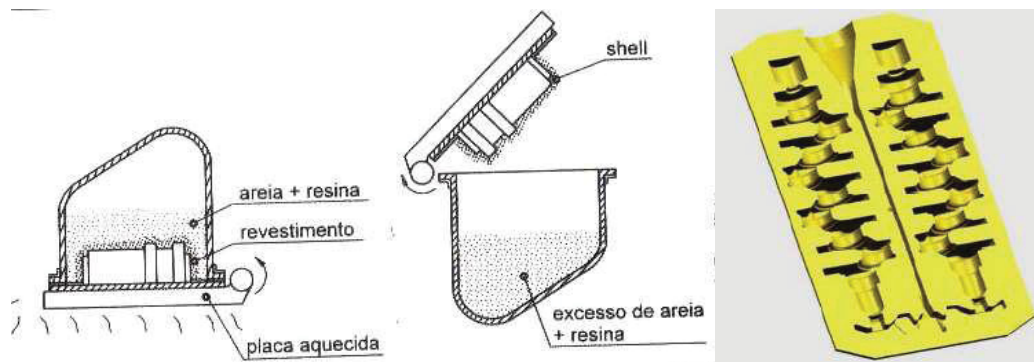
A superfície interna da casca é bastante suave e rígida. Isto permite um fácil escoamento de metal líquido para a cavidade do molde durante o jorramento do fundido, concedendo ao fundido bom acabamento superficial (IQBAL et. al., 2014).

A fundição por casca permite produzir peças complexas com espessuras menores em relação à fundição por areia. Produzir com o processo de fundição em casca também implica em alta precisão dimensional, sendo o processo facilmente automatizável (IQBAL et. al., 2014).

Moldes tipo casca são menos permeáveis que moldes de areia verde. O aglutinante pode produzir um grande volume de gás ao entrar em contato com o metal quando vazado para a fundição. Por esta razão os moldes tipos casca devem ser bem ventilados (IQBAL et. al., 2014).

Quanto mais fina a areia, maior será a permeabilidade da casca (MORO e AURAS, 2007). Na FIGURA 2 é mostrado um molde tipo casca.

FIGURA 2 - MOLDE CASCA



Fonte: MORO; AURAS (2007, p. 12).

As vantagens do processo, segundo Moro e Auras (2007) são:

- Permite que moldes e machos sejam estocados para uso posterior;
- Bom acabamento superficial;
- Estabilidade dimensional do molde;
- Tolerâncias mais estreitas;
- Facilidade de liberação de gases durante a solidificação;
- Mecanizável e automatizável;
- Adequado para peças pequenas e de formatos mais complexos.

As desvantagens, para Moro e Auras (2007) são:

- Custo mais elevado em relação à fundição em areia verde;
- Dimensões mais limitadas em relação à fundição em areia verde.

O molde construído em resina e areia possui propriedades de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1 - PROPRIEDADES DO MOLDE DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CASCA

Densidade (g/cm ³)	1,55
Condutividade Térmica (W/mK)	0,70
Calor Específico (J/Kg)	1,13
Resistência a Tração (MPa)	3,15
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,72

Fonte: DONG ET. AL. (2010).

2.1.4.1 Processo de fundição de investimento, avanços em tecnologia em casca

O termo processo de fundição de investimento é utilizado quando se utiliza processos de fundição que usam modelos descartáveis e areia-base cerâmica.

Com o avanço das tecnologias de manufatura aditiva, novos processos de fabricação de modelos para produção de moldes foram estudados e continuam sendo pesquisados.

Em um estudo com o objetivo de otimizar os parâmetros de processo de fundição em casca e aumentar a precisão em tolerância dimensional de peças fundidas, foram propostos resultados utilizando um modelo fabricado por impressão 3D, a partir de um projeto no *software* CATIA, variando-se o número de camadas de areia-base, a matéria prima do modelo e a aplicação de fibra de nylon na 1ª, 2ª e 3ª camadas de areia-base (SINGH et. al., 2014).

A conclusão da pesquisa foi que, utilizando 8 camadas de areia-base em um modelo fabricado a partir de manufatura aditiva com ABS com adição de fibra de nylon, apenas na 1ª e 2ª camadas se obtêm a maior precisão dimensional em peças fundidas com liga de alumínio LM6 (SINGH et. al., 2014).

A pesquisa realizada na *Guru Nanak Dev Engineering College*, na Índia, se relaciona com este trabalho, no sentido de que, a alteração dos materiais convencionais para a construção da casca e a aplicação de impressão 3D na fabricação do modelo, também são inovações no processo de fundição em casca que podem trazer melhores resultados na qualidade e no custo final do produto fundido.

2.1.5 Fundição por molde permanente ou por gravidade

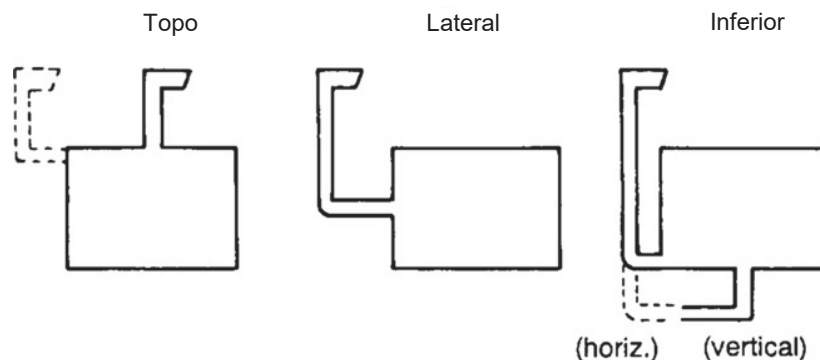
Dependendo da peça a ser fabricada, da quantidade e do tipo de liga metálica que será fundida, a melhor opção é a fundição em molde permanente. Este processo evita problemas comuns aos processos que utilizam moldes descartáveis, como quebras e deformações dos moldes, inclusões de material do molde, entre outros. A utilização do processo por molde permanente está restrita a ligas metálicas com ponto de fusão mais baixo que ligas de aço, como chumbo, zinco, alumínio, magnésio, bronze e, excepcionalmente, o ferro fundido. Comparado às peças produzidas em moldes de areia, apresentam maior uniformidade, melhor

acabamento superficial, tolerâncias menores e melhores propriedades mecânicas (MORO e AURAS, 2007).

O processo de fundição por molde permanente, ou por gravidade, é muito usado devido á simplicidade, qualidade metalúrgica e complexibilidade com que podem ser feitos os fundidos. O processo é usado para a produção de produtos fundidos da ordem de 500 a mais de 10000 por ano, com tamanho de menor que 1 kg ou até maior que 50 kg (BUTLER et. al., 2016).

No processo de fundição por molde permanente, o material fundido é jorrado no molde de aço e escoa apenas pela força da gravidade. Na maioria das vezes, fundidos por gravidade são produzidos jorrando metal por cima do molde. Mas, na prática, existem muitas variações. Às vezes, o metal é jorrado para cima do molde, mas uma cavidade é inserida pela lateral ou por baixo do molde, então, o fluxo de metal, durante o preenchimento do molde é feito por baixo ou pela lateral (Figura 3). Isto é feito para evitar turbulência e esfriamento prematuro do fundido durante o preenchimento das cavidades do molde e, também, para otimizar as condições de fundição para a produção da peça (BUTLER et. al., 2016).

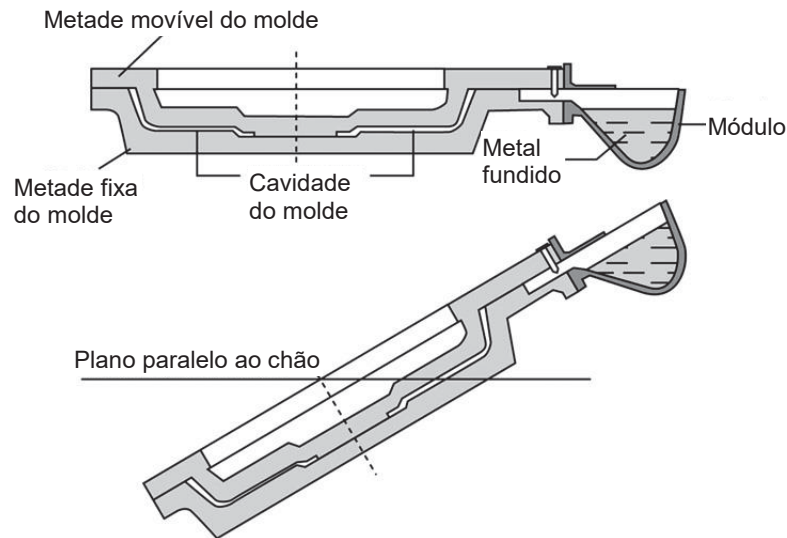
FIGURA 3 - SISTEMAS DE TRANSPORTE DE METAL FUNDIDO PARA CAVIDADE DO MOLDE



Fonte: BUTLER ET. AL. (2016).

O metal também pode ser jorrado em um módulo ao lado do molde e, então, o conjunto é inclinado para atingir um preenchimento controlado no molde (Figura 4). A Fundição com inclinação controlada é um processo desenvolvido do tradicional processo de fundição por gravidade, onde o metal líquido pode ser transferido em um molde por uma simples solução mecânica sob atuação da gravidade, mas sem turbulência de superfície. Tem o potencial para a produção de fundidos de alta qualidade (BUTLER et. al., 2016).

FIGURA 4 - ESBOÇO DO SISTEMA COM INCLINAÇÃO CONTROLADA



Fonte: BUTLER ET. AL. (2016).

Para melhorar as condições de preenchimento nas cavidades do molde e melhorar a qualidade do metal fundido, filtros de cerâmica são colocados em um pequeno corte no molde, o mais próximo possível do fundido. Filtros possuem diversas funções: (1) conter a escória e alguns óxidos, (2) controlar o fluxo de escoamento de metal, e (3) reduzir a turbulência. O escoamento de metal para dentro da cavidade do molde e o fluxo de calor do metal para o molde durante a solidificação são os 2 principais critérios para uma produção de fundição de sucesso, pelo processo por molde permanente (BUTLER et. al., 2016).

A partir dos resultados desta pesquisa e da continuidade do desenvolvimento de moldes de fundição tipo casca metálica, um importante desafio para a produção de peças fundidas de qualidade será a geração de fluxo de calor entre o metal fundido e o molde, gerando menor espessura para troca de calor, em comparação com um molde metálico.

Considerando a aplicação do molde casca para a fundição de alumínio, o coeficiente de transferência de calor na interface fundido-molde se altera com o tempo, como resultado dos diferentes estados da matéria e a expansão e contração natural do fundido durante o processo de solidificação. A espessura do fundido não influencia nos picos de temperatura para os coeficientes de transferência de calor durante um processo de fundição permanente. A espessura do fundido, no entanto, influencia na cinemática da variação dos coeficientes de transferência de calor da interface entre molde e fundido. Quanto menos espesso o fundido, menor será o

período durante o qual o pico do coeficiente de transferência de calor será mantido durante o tempo de solidificação (HAMASAIID et. al., 2019).

Máquinas são usadas para o processo de fundição por molde permanente de um conjunto único de operação, de metal manualmente jorrado, configuração que pode lucrativamente produzir 1000 peças, até um maquinário carrossel tendo múltiplos moldes automatizados, permitindo taxas de produção de 1 fundido por minuto (200.000 a 300.000 peças por ano) (BUTLER et. al., 2016).

Os moldes do processo de fundição por molde permanente, ou por gravidade, são produzidos de ferro fundido perlítico de grãos finos ou aço endurecido baixa liga. A taxa de transferência de calor é maior do que no processo por moldes de areia ou cerâmica usados em outros processos e isso promove vantagens de tempo de ciclo da fundição. Um desmoldante cerâmico é usualmente aplicado na superfície do molde para proteção de metal fundido e redução da taxa de transferência de calor do metal fundido para o molde, as taxas de resfriamento são mais rápidas que para os moldes de areia (BUTLER et. al., 2016).

Considerando um molde fabricado com aço liga H13 (muito utilizada para moldes permanentes), com capacidade de produção de até 800.000 peças, as propriedades são listadas na TABELA 2.

Por outro lado, as peças devem ser de tamanho pequeno, produzidas em grande quantidade, e devem possuir formatos simples. Os moldes possuem duas ou mais partes unidas por grampos, os quais são fechados manualmente ou automaticamente (JANSEN, 2013).

Antes de fechados para receberem o material fundido por gravidade, a cavidade é coberta com uma pasta adesiva de material refratário para proteger os moldes e facilitar a desmoldagem das peças. Após o fechamento, ocorre o vazamento por gravidade (MORO e AURAS, 2007).

Depois da solidificação da peça, o molde (FIGURA 5) é aberto e a peça é ejetada por pinos de acionamento hidráulico (quando o processo não é manual) (JANSEN, 2013).

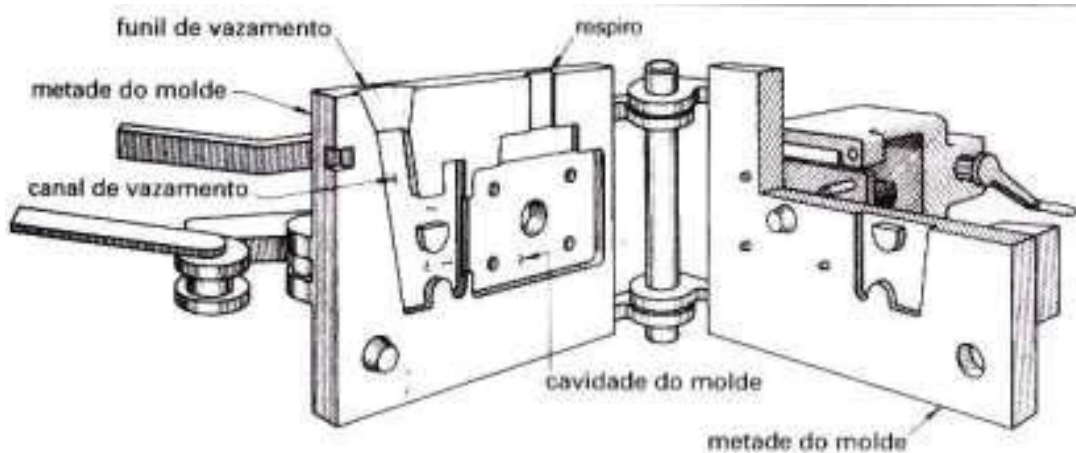
As vantagens do processo de fundição em molde permanente, para Moro e Auras (2007), são:

- Alta capacidade de produção;
- Grande automação do processo.

As desvantagens deste processo segundo, Moro e Auras (2007), são:

- Não permite materiais com alto ponto de fusão;
- Dimensões e pesos limitados;
- A produção deve ser grande para compensar o custo do molde;
- Retenção de ar no interior da matriz, gerando peças incompletas e porosas.

FIGURA 5 - MOLDE PERMANENTE DE FECHAMENTO MANUAL



Fonte: MORO; AURAS (2007, p. 16).

TABELA 2 - PROPRIEDADES DE UM MOLDE PERMANENTE FABRICADO COM AÇO LIGA H13

Densidade (g/cm ³)	7,87
Condutividade Térmica (W/mK)	29,10
Calor Específico (J/Kg)	0,45
Resistência a Tração (MPa)	1200 ~ 1590
Módulo de Elasticidade (GPa)	215
Dureza (HrC)	45

Fonte: Adaptado de YUNUS ET. AL. (2018).

2.1.6 Comparação entre processos

Paralelamente ao projeto de um componente, o processo de produção a ser utilizado para a sua fabricação já deve estar sendo pensada. Quando a escala de produção de um componente é alta e a geometria da peça é complexa, é comum se optar por um processo de fundição com posterior processo de usinagem, quando necessário, para garantir tolerâncias dimensionais. Quando se opta pela produção a

partir de um processo de fundição, é necessário escolher um processo que atenda as especificações do componente e que tenha viabilidade econômica.

Visto que esta pesquisa apresenta a viabilidade técnica para o desenvolvimento de um processo mesclado entre o processo de fundição por molde permanente e o processo de fundição em casca, a partir das características dos 2 processos, é possível estimar as características do processo mesclado.

A TABELA 3 a seguir apresenta as principais características dos processos de fundição.

TABELA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS

	Areia Verde	Shell Molding	Cera Perdida	Molde Permanente
Tolerância dimensional	±1,2 mm ±3,8 mm	±0,25 mm ±5 mm	±0,02 mm ±3,8 mm	±2,5 mm ±7,5 mm
Custo relativo (grande quantidade)	Baixo	Médio Alto	Mais Alto	Baixo
Custo relativo (pequena quantidade)	Mais Baixo	Médio Alto	Médio	Alto
Peso fundido	Ilimitado	113,4 kg	45,4 kg	45,4 kg
Espessura mínima	2,5 mm	2,5 mm	1,6 mm	3,2 mm
Acabamento superficial relativo	Razoável Bom	Bom	Bom	Bom
Facilidade de fundição de peça complexa	Razoável	Bom	Melhor	Razoável
Facilidade de alteração de projeto	Melhor	Razoável	Razoável	Ruim
Ligas que podem ser fundidas	Ilimitada	Ilimitada	Ilimitada	Melhor Base Al e Cu

Fonte: Adaptado de MORO e AURAS (2007).

Peças que são fabricadas a partir de processos de fundição possuem diferenças de rugosidade superficial, de acordo com o processo de fundição utilizado. A TABELA 4 apresenta rugosidades típicas de alguns processos.

TABELA 4 - RUGOSIDADES SUPERFICIAIS DE PRODUTOS DE FUNDIÇÃO

Processo de Fundição	Rugosidade (RMS)	Rugosidade (Ra)
<i>Shell Molding</i>	75 ~ 150	2,114 ~ 4,229
Fundição sob pressão	90 ~ 200	2,537 ~ 5,639
Fundição por areia verde	250 ~ 900	7,049 ~ 25,375

Fonte: Adaptado de *IRON-FOUNDRY* (2021).

2.2 ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de aspersão térmica inclui uma série de processos de revestimento nos quais os materiais metálicos e não metálicos são aspergidos em pequenas partículas no estado fundido ou semi fundido, ou até sólido, para formar um revestimento. No processo, uma fonte de calor, que pode ser chama, arco elétrico ou gás ionizado (plasma), é usado para fundir um consumível (pó, arame, vareta) e acelerar as partículas até uma superfície sólida. Outras fontes térmicas e cinéticas são usadas atualmente, como por exemplo, raios laser e fluxo de jatos de gás inertes no processo *cold spray* (VUORISTO, 2014).

As fontes de calor fornecem a energia térmica para que o material a ser depositado atinja o estado fundido ou de alta plasticidade (nos processos clássicos). Uma parte da energia cinética é proveniente do gás de transporte (ar comprimido ou gás inerte). Os gases do plasma ou da combustão, o ar comprimido ou o gás inerte se expandem acelerando as partículas do material fundido e/ou semifundido contra a superfície do substrato (SUCHARSKI, 2012).

Os revestimentos são formados de partículas deformadas e sólidas. Os materiais para revestimento incluem metais puros, ligas metálicas, metais duros (carbetos), óxidos cerâmicos, plásticos, *cemets*, e compósitos. Praticamente todos os materiais podem ser aspergidos, exceto compostos que se decompõem irreversivelmente durante a fusão e aqueles que não têm estabilidade no estado fundido e vaporizam excessivamente no processo de aspersão térmica. Alguns materiais, como por exemplo, cerâmicas de sílica e magnésia, são difíceis de aspergir. A taxa de produção de revestimento, no processo de aspersão, é alta, quando comparada com outras tecnologias de deposição de material. Dependendo da aplicação, revestimentos por aspersão térmica possuem espessura de alguns micrometros até muitos milímetros. Devido à versatilidade da aspersão térmica em

relação a matérias de revestimento, processos, propriedades de revestimento e também, em muitos casos, eficiência econômica, os revestimentos de aspersão térmica são industrialmente muito usados, por exemplo, em aplicações de engenharia mecânica nas indústrias de aviação, tecnologias energéticas, papel, infraestrutura, biomédica, eletrônica, entre outros (VUORISTO, 2014).

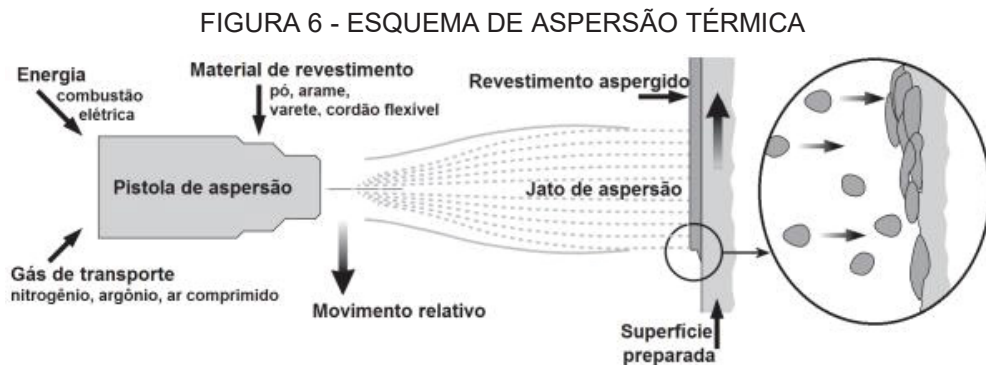
A flexibilidade do processo de aspersão térmica é provavelmente a maior de todas as tecnologias de deposição de materiais. Isso devido a muitas razões, particularmente, segundo Vuoristo, devido aos seguintes recursos do processo de aspersão térmica:

- Grande variedade de diferentes tipos de materiais para revestimentos estão disponíveis, incluindo metais puros, ligas metálicas, metais duros (carbeto/*cemets*), cerâmicas, polímeros e outros;
- Resistência ao desgaste, dureza, e força de adesão. Claramente adequado para muitas aplicações industriais;
- Várias propriedades e funcionalidades podem ser obtidas por meio de revestimentos de aspersão térmica;
- A taxa de produção de aspersão térmica é notadamente alta e aplicável para grandes áreas de superfície;
- A quantidade de energia necessária para revestir é notadamente baixa para aspersão térmica; dispensando mudança metalúrgica ou distorção dos componentes;
- Os custos para a fabricação dos revestimentos são aceitáveis para a maioria das aplicações industriais;
- Novas variantes de aspersão térmica têm sido desenvolvidas, por exemplo, *cold spray*, permitindo novas possibilidades em áreas de aplicação totalmente novas.

Ao se chocarem contra a superfície, as partículas se achatam e se aderem mecanicamente ao substrato, assim como sobre as partículas já existentes. Deste modo, o revestimento é então formado por uma série de camadas sobrepostas, em forma de lamelas, oriundas do espalhamento destas partículas fundidas. Essas camadas são constituídas de partículas achatadas, contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade (MARIANO e PAREDES, 2010).

Durante o processo de revestimento, a interação entre os gases e as partículas é essencialmente determinada pela dinâmica dos gases no processo de aspersão.

A FIGURA 6 a seguir apresenta o esquema de funcionamento básico dos processos de aspersão térmica de forma esquemática.



Fonte: Adaptado OERLIKON (2016).

É importante destacar que no momento do contato das partículas com o substrato é transferida uma grande quantidade de energia cinética e térmica, gerando uma transferência de calor que, em condições especiais, pode levar à difusão de alguns dos constituintes do material aspergido para o substrato ou até a formação de pontos de microsoldagem. Este mecanismo pode ser incentivado utilizando o recurso de pré-aquecimento do substrato (PAREDES, 1998; PUKASIEWICZ, 2008; SUCHARSKI, 2012).

Atualmente, a tecnologia de aspersão térmica apresenta para a indústria diversas opções de processos. A revisão bibliográfica para a pesquisa em questão, mostra de forma detalhada um dos processos disponíveis para a realização dos experimentos, o processo por arco elétrico. O processo de aspersão *cold spray* também é detalhado, pois possui características interessantes para o desenvolvimento do estudo. Também será apresentada a argumentação para a seleção do processo adotado para o desenvolvimento da pesquisa. Os processos de aspersão térmica com grande aplicação no mercado e que não serão detalhados nesta revisão são:

- Chama;
- HVOF;

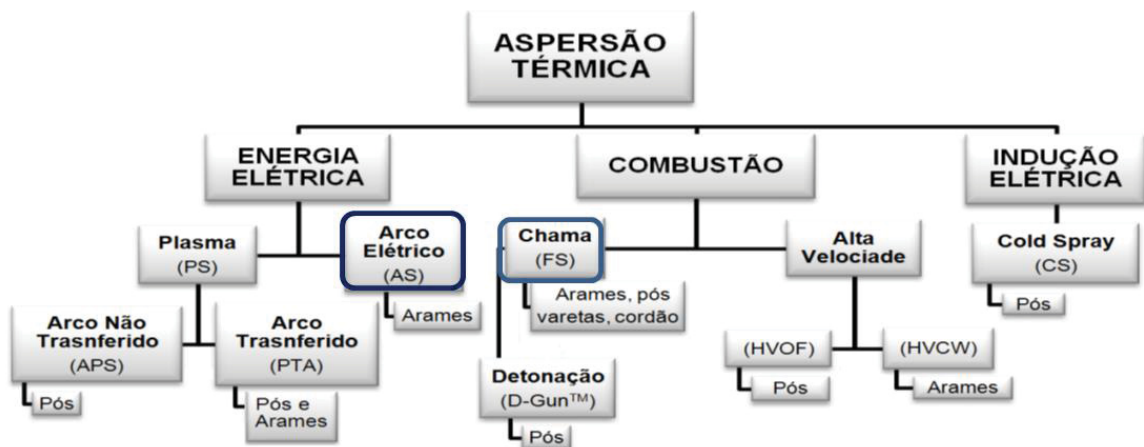
- Plasma;
- Plasma de alta energia;
- Plasma a vácuo;
- Detonação.

2.2.1 Processos de aspersão térmica

A tecnologia de aspersão térmica envolve diferentes tipos de processos de deposição, nos quais são utilizadas fontes concentradas de calor para fundir material consumível e projetar as partículas fundidas em diferentes níveis de energia cinética em uma superfície a ser revestida (VUORISTO, 2014).

A classificação dos processos de aspersão térmica é dividida em dois grupos, um grupo utiliza chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. Classificação dos processos, como demonstrada de acordo com o diagrama da FIGURA 7.

FIGURA 7 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA



Fonte: LABATS (2020).

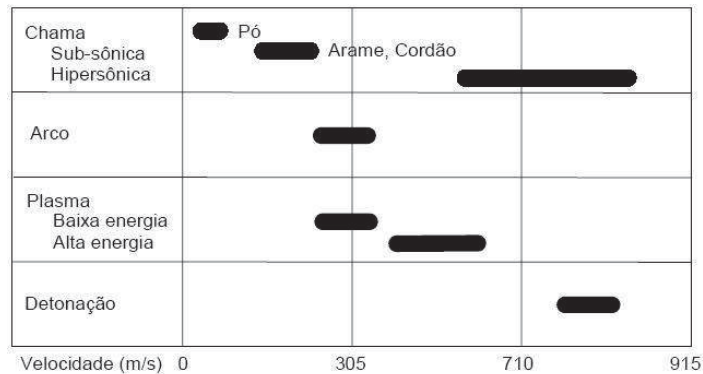
O material do revestimento, o método de aquecimento e o método de aceleração das partículas são variações básicas dos processos de aspersão térmica. Na TABELA 5 são mostradas as temperaturas dos gases combustíveis utilizados e na FIGURA 8 é apresentada as velocidades de impacto das partículas conforme seus métodos de aplicação (PAREDES, 2012).

TABELA 5 - TEMPERATURAS DAS FONTES DE CALOR ADAPTADO, (ASM, 1994)

Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2526
Gás Natural + Oxigênio	2538
Hidrogênio + Oxigênio	2660
Propileno + Oxigênio	2843
Acetileno + Oxigênio	3087
Arco Plasma	2200 ~ 28000

Fonte: ASM (1994).

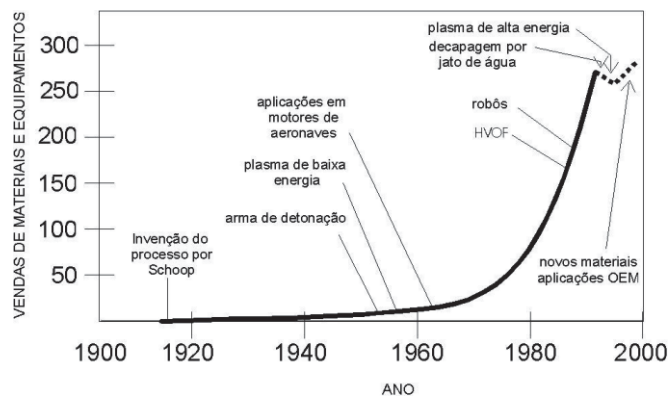
FIGURA 8 - VELOCIDADE MÉDIA DE IMPACTO DAS PARTÍCULAS CONFORME OS PROCESSOS



Fonte: PAREDES (2012, p. 6).

Na FIGURA 9 é mostrada a curva de desenvolvimento crescente da indústria de aspersão térmica, onde se observa, a partir do ano de 1970 ocorreu um aumento nas vendas relativo aos processos de aspersão térmica oxi-combustível de alta velocidade e plasma de alta energia (PAREDES, 2012).

FIGURA 9 - HISTÓRIA E CRESCIMENTO DA INDÚSTRIA DE ASPERSÃO TÉRMICA



Fonte: PAREDES (2012, p. 7).

2.2.1.1 Aspersão térmica por arco elétrico - ASP

Entre os primeiros processos de aspersão térmica inventados, o processo por arco elétrico permanece como o favorito para diversas aplicações de revestimento. Utilizando apenas potência elétrica, o arco elétrico não necessita de gases, apenas ar comprimido. Como resultado, os revestimentos são caracterizados como limpos e com maior capacidade de trabalho mecânico em comparação com os demais processos. Com menor número de parâmetros de processo em comparação com os outros processos de aspersão, os sistemas de arco elétrico com arames mostram simplicidade de operação e manutenção, produzindo resultados de revestimentos confiáveis e robustos. Como todos os processos de aspersão, o processo por arco elétrico com arames requer uma fonte de calor para fundir o arame, no entanto, é o único que não necessita de gases para gerar a fonte de calor. O processo arco elétrico utiliza dois arames, geralmente de mesma composição, como matéria prima para revestimento. Os dois arames são carregados eletricamente com polaridades opostas, que alimentam a pistola de arco elétrico em combinação com controle de velocidade. Quando os arames entram em contato, as cargas opostas criam o arco que continuamente fundem as pontas dos arames. O ar comprimido é utilizado para atomizar o material fundido e o acelerar para uma superfície preparada para revestimento (OERLIKON, 2016).

Às vezes, o ar é substituído por nitrogênio para redução do nível de oxidação do revestimento metálico (VUORISTO, 2014).

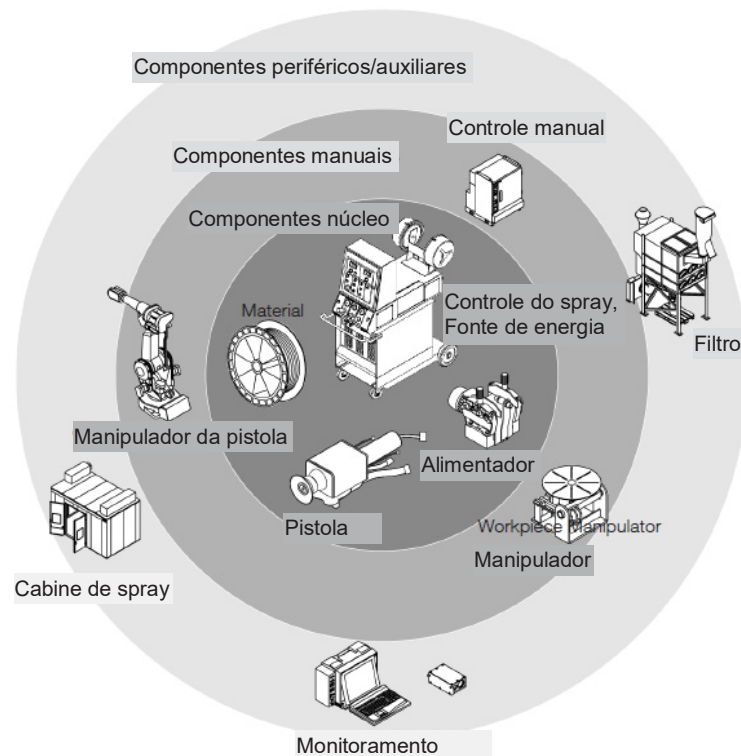
Como a temperatura do arco varia de 4000 a 6000°C, sendo muito maior que o ponto de fusão do material aspergido, Marques afirma que algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir áreas de reação química ou difusão, ou ambas, após o impacto com o substrato. Estas interações são similares a pequenas soldas, a ponto de conferir ao revestimento excelente resistência à adesão e coesão.

Na FIGURA 10 são mostrados os componentes normais de um equipamento a arco elétrico:

- Fonte de voltagem constante, retificador de corrente DC / suprimento de energia;
- Suprimento de ar comprimido e filtro;

- Alimentador de arame consistido de motor elétrico ou acionado a ar, roda motriz e dispositivo tensionador da roda motriz;
- Pistola de arco elétrico consistindo no corpo da pistola, bocal de ar e capa de ar;
- Bobina de arame.

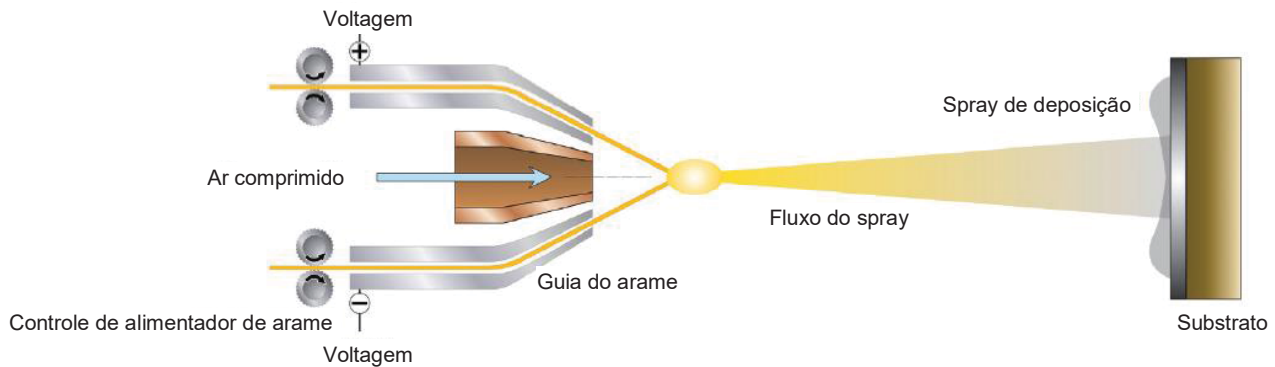
FIGURA 10 - COMPONENTES DE INSTALAÇÃO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



Fonte: OERLIKON (2016).

Esta técnica difere de outras técnicas de aspersão térmica pelo fato de não haver fonte externa de calor, tais como chama de gás ou plasma induzido eletricamente. De acordo com a FIGURA 11, o aquecimento e a fusão ocorrem quando os arames (material de aporte) são carregados eletricamente com cargas opostas, onde um arame é positivo (o ânodo) e o outro negativo o (cátodo), e são alimentados conjuntamente sendo gerado um arco controlado quando de sua interseção. Um fator limitante para esta técnica é o fato de que os materiais aplicados serem eletricamente condutores (LIMA E TREVISAN, 2002). Na FIGURA 12 é observado um dos equipamentos de aspersão por arco elétrico utilizado para os experimentos.

FIGURA 11 - ESQUEMA DO PROCESSO A ARCO ELÉTRICO



Fonte: OERLIKON (2016).

O gás de atomização adicional faz com que as partículas não se aglomerem em seu trajeto até o substrato, gerando camadas de revestimento mais homogêneo.

FIGURA 12 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO



Fonte: PAREDES (2012, p. 31).

Os tipos de materiais que podem ser aplicados pelo processo a arco estão limitados a arames sólidos ou tubulares que sejam condutores (LACERDA et. al., 2021).

Características do revestimento através do processo a arco elétrico (PAWLOWSKI, 2008):

- Distância de aplicação de 50 a 170 mm;
- Alimentação de arame de 50 a 1000 g/min;
- Diâmetro mais comum do arame de 1,6 a 5,0 mm;

- Com uma corrente de 280 A, a temperatura do arco pode atingir até 5800°C;
- Potência elétrica de 5 a 10 kW;
- Diferença de potencial entre os arames de 20 a 40 volts;
- Pressão do gás de atomização de 0,2 a 0,7 MPa;
- Fluxo de gás de atomização de 20 a 1300 l/min;
- Velocidade das partículas e dos arames fundidos, pode atingir até 150 m/s.

O processo de aspersão térmica a arco elétrico tem como propriedades principais (PAWLOWSKI, 2008):

- Aderência da camada de zinco e alumínio de 10 a 30 MPa, e para ligas de NiAl pode chegar a 70 MPa.
- Porosidade entre 10 a 20%.
- Espessura de camada de 100 a 2000 μm , (0,1 a 2,0 mm).

No campo de processos de aspersão térmica de espessuras elevadas, OSAKA FUJI Corporation desenvolveu uma especificação com capacidade de camadas e sobrecamadas que podem atingir espessuras maiores do que 20 mm (*Thermal spray booklet of OFIC*). Como pode ser visualizado na FIGURA 13.

FIGURA 13 - ASPERSÃO ARCO ELÉTRICO OFIC



Fonte: OSAKA FUJI CORP. (2020, p. 9).

Características gerais:

- Adesão e resistência ao dobramento maiores em relação a processo chama;
- Maior eficiência na aspersão;

- Aspersão de todos os metais com capacidade de se dispor em forma de arame;
- Sem deterioração e mudanças nos materiais a serem aspergidos devido à baixa temperatura em aspersão;
- Propriedade superior de retenção de óleo e melhora no desgaste por deslizamento devido a poros interiores da camada.
- OFIC torna possível aumentar a espessura de sobrecamada em até 20 mm.

2.2.1.1.1 Aspersão térmica por arco elétrico de alumínio

Aspersão térmica por arco elétrico de revestimentos de alumínio tem sido usada nos anos recentes como revestimento protetivo devido a sua capacidade de suportar altas temperaturas e ter um processo de custo eficiente. Tem sido usada por muitas indústrias do setor de petróleo e gás, aonde a maioria das aplicações são em condições atmosféricas. Alumínio puro e ligas de alumínio são normalmente usadas no processo de aspersão térmica como revestimentos. De acordo com a *American Welding Society*, o alumínio é o material mais excepcional em ambientes agressivos, como o marinho, sob isolamento térmico ou sobre superfícies quentes. As vantagens do revestimento de alumínio inclui a sua habilidade de formar filmes passivos, aonde se tem baixa taxa de corrosão e suporta processos de altas temperaturas (MALEK et. al., 2013).

Pesquisadores da Universiti Teknologi Mara, em Selangor, na Malásia, estudaram as propriedades e microestrutura de revestimento de alumínio (99,5%) produzidos por processo de aspersão térmica por arco elétrico. Para o experimento, foram fabricados corpos de prova de aço de 150 mm de comprimento, 50 mm de largura e 2 mm de espessura. Todas as superfícies das amostras foram limpas de contaminações (óleos e graxas). A limpeza foi feita com água e com posterior aplicação de etanol e então foram submetidas a processo de secagem. As amostras foram submetidas à jateamento abrasivo com pressão de 4 a 6 bars para preparação na superfície, atingindo nível de limpeza de acordo com a norma ISO8501-1, onde a rugosidade da superfície deve ser de 75 a 110 micron, para a melhor aderência do revestimento. O jateamento foi executado utilizando malha 20/40. A Tabela 6 mostra a especificação do alumínio para o revestimento e do substrato de aço.

TABELA 6 - ESPECIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA REVESTIMENTO E DO SUBSTRATO DE AÇO

Nº	Material	Composição Química	m%
1	Liga de Alumínio	Si	0,065
		Fe	0,182
		Cu	0,0032
		Cr	0,0013
		Ni	0,002
		Zn	0,001
		Ti	0,002
		Co	0,001
		Outros	0,0489
		Alumínio	Restante
		2	Substrato
C	0,0555		
Mn	0,524		
S	0,0163		
Si	0,145		
Sb	0,0115		
Mo	0,0252		
Ti	0,015		
Sb	0,0115		
Outros	0,0638		

Fonte: MALEK ET. AL. (2013).

Depois do jateamento, as amostras foram revestidas por arco elétrico com alumínio 99,5%. Os parâmetros de processo são mostrados na Tabela 7. Diferentes espessuras de revestimento foram aplicadas em cada amostra, tornando-se uma variável de processo, como ilustrado na Tabela 8.

TABELA 7 - PARÂMETROS DO PROCESSO POR ARCO ELÉTRICO PARA O EXPERIMENTO COM ALUMÍNIO 99,5%

Nº	Parâmetros	Valor
1	Ar comprimido (bar)	6
2	Tensão (V)	30
3	Corrente (A)	200
4	Humidade relativa	<85%
5	Ângulo de aplicação (°)	90

Fonte: Adaptado de MALEK ET. AL. (2013).

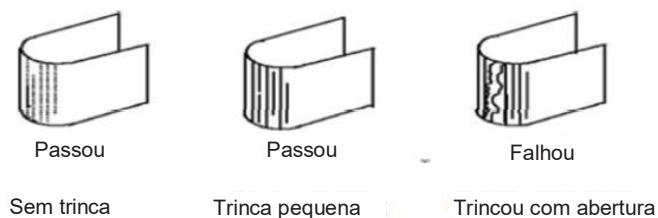
Para a validação da aspersão térmica por arco elétrico com alumínio, testes mecânicos foram realizados. Teste de adesão entre o revestimento e o substrato para checar qualquer fraqueza no sistema de revestimento. E um teste de dobra para avaliar a ductibilidade do revestimento. Ambos os testes são relacionados entre si e devem apresentar bons resultados. Seis amostras foram preparadas de acordo com os parâmetros da Tabela 8 e todas foram submetidas ao teste em 180° usando uma alavanca de 13 mm de diâmetro. As amostras foram visualmente inspecionadas de acordo com a Figura 14. No teste de adesão um suporte é usado para puxar o revestimento, usando uma cola epoxy (FIGURA 15). A força é aumentada gradualmente até o deslocamento do revestimento, e o valor da força foi registrado. O resultado de adesão mínimo deve ser de 7 MPa para qualquer medição, valores abaixo disso são considerados fora de especificação.

TABELA 8 - PARÂMETROS VARIÁVEIS DO REVESTIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 99,5%

Amostra	Espessura do Revestimento, microns
1	222
2	227
3	258
4	320
5	373
6	397

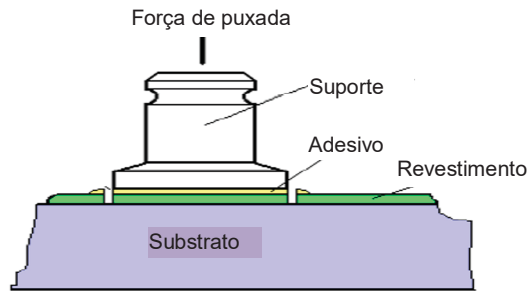
Fonte: Adaptado de MALEK ET. AL. (2013).

FIGURA 14 - TESTE DE DOBRA



Fonte: MALEK ET. AL. (2013).

FIGURA 15 - ESQUEMA TESTE DE ADESÃO



Fonte: MALEK ET. AL. (2013).

Para este estudo os testes de adesão e de dobra foram considerados falhos, como evidenciados na TABELA 9.

TABELA 9 - TESTE DE ADESÃO E DE DOBRA

Amostra	Teste de Adesão (MPa)	Teste de dobra
1	10,74	OK
2	9,38	OK
3	9,8	OK
4	11,16	OK
5	11,53	OK
6	12,38	OK

Fonte: Adaptado de MALEK ET. AL. (2013).

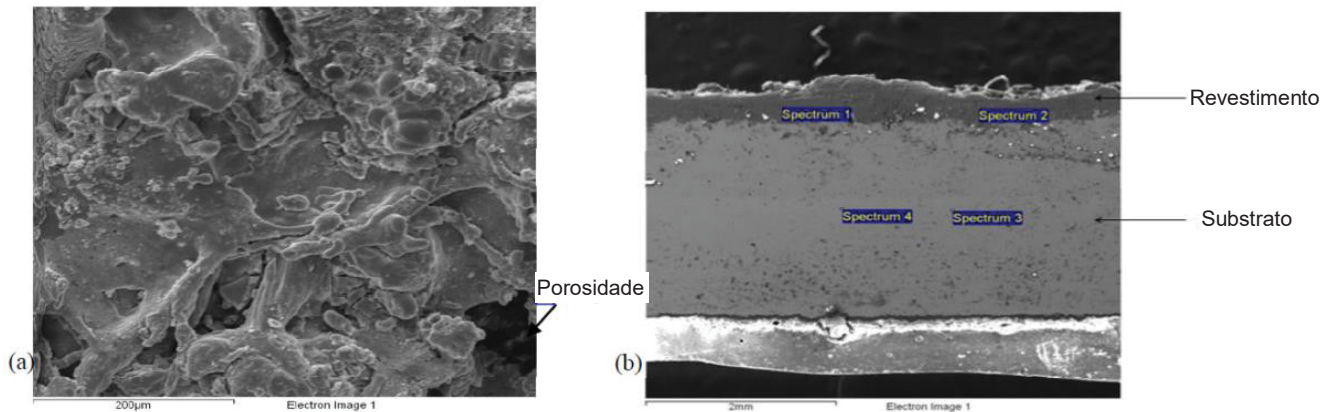
Baseado nos resultados dos testes é possível verificar que todas as amostras passaram nos testes, visto que nenhuma trinca foi desenvolvida. No teste de adesão os revestimentos foram carregados pelo suporte até o deslocamento, sendo um resultado foi positivo, considerando que todas as amostras apresentaram requerimento mínimo de 7 MPa.

A amostra 1, com espessura de revestimento de 222 microm, apresentou a maior eficiência econômica e resultado otimizado para o teste de adesão com 10,74 MPa.

Das seis amostras, duas foram selecionadas para a realização do teste de dureza, sendo que os resultados para as amostras de espessuras 373 e 397 microm apresentaram uma dureza média de 210 Hv, o que, convertida para tensão utilizando o sistema internacional de unidades, equivale a 2059 MPa.

O substrato com o revestimento de espessura 397 mícron foi selecionado para análise morfológica como apresentado na Figura 16.

FIGURA 16 - MICROGRÁFIA DE A) SUPERFÍCIE 300X E B) SEÇÃO TRANSVERSAL DO REVESTIMENTO 30X



Fonte: Adaptado de MALEK ET. AL. (2013).

Da análise macrográfica da superfície do revestimento (FIGURA 16), é possível verificar presença de porosidade. Os poros não são críticos, especialmente para resistência a corrosão, devido ao pequeno tamanho e a localização dos poros da superfície do revestimento. A justificativa para o pequeno tamanho da porosidade foi devido à indução de gases durante o processo por arco elétrico. A porosidade pode ocorrer da estrutura lamelar onde partículas semi fundidas estiveram presentes. As partículas semi fundidas fizeram pequenos furos dentro do revestimento, formando porosidade. De acordo com os resultados mecânicos, todas as amostras passaram nos testes, confirmaram a qualidade do revestimento.

A pesquisa foi finalizada com a conclusão de que a força de adesão para o revestimento aumenta de acordo com o aumento de espessura. Os experimentos apresentaram um revestimento de 397 mícron de espessura com força de adesão de 12.38 MPa, sendo ideais os revestimentos a partir de 200 mícron.

A pesquisa e o artigo da Universiti Teknologi Mara enriquecem este trabalho com mais dados sobre o processo de aspersão por arco elétrico utilizando alumínio, processo e matéria prima utilizados para os experimentos de validação dos objetivos propostos e dão início á linha de pesquisa de fundição por casca metálica.

Um dado interessante é o aumento de adesão do revestimento quando se aumenta a espessura. Dado que o revestimento a ser testado para este trabalho

deve ser espesso e com pouca adesão objetivando a retirada do modelo, a pesquisa da Malásia fornece um ponto de partida para um processo de otimização de adesão e espessura de camada de revestimento.

2.2.2 Comparações entre processos

As TABELAS 10 e 11 mostram de forma resumida informações sobre os processos de aspersão térmica.

TABELA 10 - OS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE CONTROLE DOS PROCESSOS DE AT

Processos	Parâmetros	Processos	Parâmetros
Chama Convencional FS	Pré-aquecimento	HVOF modelo DJ Metco	Pressão de oxigênio
	Distância		Fluxo de oxigênio
	Fluxo de oxigênio		Fluxo de nitrogênio
	Fluxo de acetileno		Pressão de propano
	Pressão de ar		Fluxo de propano
	Fluxo de ar		Distância
Arco Elétrico ASP	Pressão de ar primário	HVOF modelo TAFA	Pressão de oxigênio
	Pressão de ar secundário		Fluxo de oxigênio
	Diferença de potencial entre os arames		Fluxo de querosene
	Corrente		Pressão de querosene
	Limpeza		Fluxo de água de refrigeração
	Pré-aquecimento		Distância
Cold Spray	Pré-aquecimento		
	Distância		
	Fluxo de oxigênio		
	Fluxo de gás (Hélio ou Nitrogênio)		
	Fluxo de matéria prima (Pó)		
	Ângulo de aplicação		

Fonte: PAREDES (2012); ZHENHUA ET. AL. (2013).

TABELA 11 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE PROCESSOS DE AT

(Continua)

Processos	Vazão de gases (m³/h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta
Plasma	4,2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240	6	Alta
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta
HVOF	28 ~ 57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610 ~ 1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17 ~ 28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240 ~ 1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar, He	210 ~ 610	9	Muito Alta
<i>Cold Spray</i>	53	400	N ₂ , O ₂ , He	600	N/A	N/A

Fonte: PAREDES (2012); ZHENHUA ET. AL. (2013).

TABELA 11 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE PROCESSOS DE AT

(Conclusão)

Processos	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	6	3	7	25 ~ 75	11 ~ 22
Chama (Arame)	4	3	9	50 ~ 100	11 ~ 22
Arco (Arame)	0,5 ~ 3	1	16	4 ~ 6	0,2 ~ 0,4
Plasma	0,5 ~ 1	5	5	30 ~ 80	13 ~ 22
Detonação	0,1	10	1	100 ~ 270	220
HVOF	0,2	5	14	100 ~ 270	22 ~ 200
Plasma de alta energia	0,1	4	23	100 ~ 250	9 ~ 13
Plasma a vácuo	ppm	10	10	50 ~ 100	11 ~ 22
<i>Cold Spray</i>	N/A	N/A	15	N/A	N/A

Fonte: PAREDES (2012); ZHENHUA ET. AL. (2013).

São mostradas nas TABELAS 12 e 13 as vantagens e desvantagens para os processos de aspersão térmica.

TABELA 12 - VANTAGENS RELACIONADAS AOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Detonação	Excelente coesão
	Camada com baixo índice de porosidade
	Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores
Chama Oxiacetilênica	Permite a aplicação de 3 tipos de camadas: - Ligas para camadas fundidas, resistentes a corrosão e oxidação - Ligas com carbetos, recomendados onde as condições de abrasão são severas - Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão e também funcionam como isolantes térmicos e elétricos
	Maior aderência
	Maior coesão entre as partículas
	Maior taxa de deposição chegando a aplicar 30 kg/h
Arco elétrico	Materiais mais usados são: aço inoxidável martensítico e austenítico, bronze, alumínio, cobre, molibdênio e carbetos
	Menor porosidade
	Maior dureza
	Menor quantidade de óxidos
	Melhor resistência ao desgaste
HVOF	Maior adesão
	Propriedades físicas e metalúrgicas das camadas depositadas superiores às aplicadas pelos outros processos
	Porosidade reduzida
	Melhor aderência
	Menor conteúdo de óxidos
Plasma	Eficiência Térmica
	Eficiência Energética
	Baixo teor de óxidos
	Tensões Residuais desprezíveis
	Sem reações químicas indesejadas
Cold Spray	

Fonte: PAREDES (2012); ZHENHUA ET. AL. (2013); MORIDI ET. AL. (2014).

TABELA 13 - DESVANTAGENS RELACIONADAS AOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

Detonação	Operações devem ser automatizadas
	Operações devem ser controladas a distância
	Ambiente necessita proteção acústica
	Altíssimo nível de ruído, acima de 150 decibéis
Chama Oxiacetilênica	Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido
	Aderência prejudicada
	Necessário o uso de gás inerte para transporte das partículas
Arco elétrico	Alta porosidade
	Alta presença de óxidos
	Presença de partículas não fundidas
	Maior rugosidade em comparação aos demais processos
HVOF	Devido utilização dos combustíveis (propileno, propano ou querosene), requer maior atenção a segurança da instalação
Plasma	Melhor qualificação do operador
	Proteção extra ao operador, devido à energia liberada
Cold Spray	Baixa eficiência de deposição

Fonte: PAREDES (2012); KURODA ET. AL. (2008); LACERDA ET. AL. (2021).

Em relação aos processos de aspersão térmica, a revisão bibliográfica para este trabalho detalha o processo de aspersão por arco elétrico, processo que esteve disponível para a execução dos experimentos. A literatura de aspersão térmica apresenta capacidade para o processo por arco elétrico de depositar camadas de espessuras relativamente grandes em comparação aos demais processos. Atualmente, no mercado, existem soluções para processo de aspersão térmica de grandes espessuras. Um fabricante de máquinas de aspersão térmica, a OSAKA FUJI CORPORATION, está inserida no mercado como um vetor para desenvolvimento de tecnologia de aspersão térmica de camadas mais espessas, possuindo em seu catálogo de máquinas, um processo por arco elétrico já desenvolvido e com capacidade de revestimento de grandes espessuras.

2.2.3 Preparação da superfície

Com a escolha do processo de aspersão e do material de aporte a próxima etapa é a preparação da superfície para garantir a qualidade de adesão do revestimento. O procedimento para preparar o substrato tem a finalidade de deixar a

superfície ativa permitindo que as partículas propelidas tenham no momento do impacto, a máxima potencialização de aderência. A preparação da superfície é a etapa mais crítica da operação de aspersão térmica. A qualidade da adesão do revestimento está diretamente relacionada com a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato. A obediência rigorosa a procedimentos padronizados de preparação da superfície é necessária para garantir o sucesso na aplicação de revestimentos por aspersão térmica. A preparação da superfície para o processo de aspersão térmica ocorre mediante quatro etapas (MARQUES, 2003).

- Limpeza;
- Rugosidade da superfície
- Camada de ligação
- Pré-aquecimento

Um dos objetivos específicos do trabalho é após a aplicação de revestimento, extrair a casca metálica do modelo sem romper e danificar a geometria da casca. A extração da casca depende de baixa adesão do revestimento em relação ao substrato, portanto, para a preparação da superfície do modelo, não é recomendado realizar a etapa de limpeza, que para esta pesquisa, seria mecânica por jateamento, tecnologia disponível para o trabalho.

2.2.4 Limpeza

O primeiro passo na preparação do substrato para a aspersão térmica é a retirada de todos os contaminantes superficiais, tais como poeira, óleo, graxa e pintura. Depois que todos os contaminantes forem eliminados, a limpeza deve ser mantida até que o ciclo de revestimento se complete. As peças devem ser protegidas de partículas transportadas pelo ar e marcas de dedos, bem como ser manuseadas com ferramentas e material limpo (MARQUES, 2003).

A limpeza pode ser realizada de forma mecânica ou química. O processo de limpeza mecânica consiste na premissa de abrasão em que camadas da superfície serão removidas através da interação com um material de maior dureza e este processo pode ser realizado por escovação ou jato abrasivo úmido ou seco (MARQUES, 2003).

2.2.5 Rugosidade da superfície

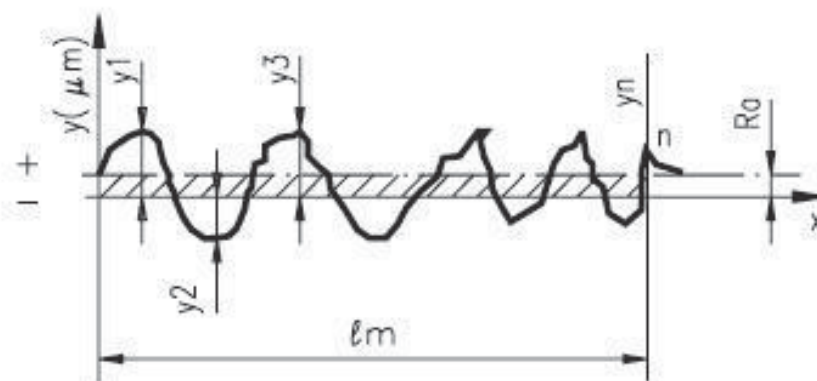
O próximo processo realizado após a limpeza do substrato é prepará-la para apresentar uma rugosidade apropriada para proporcionar uma adesão que garanta a qualidade do revestimento. A introdução da rugosidade correta fará com que esta não interfira na rugosidade final do revestimento aspergido (MARQUES, 2003).

Uma superfície rugosa tem mais área superficial de que uma superfície polida então as partículas terão mais área de contato, zona ativa, para se aderirem ao substrato, pois terá mais pontos de ancoramento mecânico e eliminará os planos preferenciais de cisalhamento que existem nas camadas depositadas em virtude da sua estrutura típica lamelar. Desenvolvem-se nestas camadas grandes tensões paralelas à base que são responsáveis pela sua baixa resistência à tração e isto pode ser verificado quando se fazem testes de aderência (MARQUES, 2003).

A avaliação dos parâmetros de rugosidade pode ser feita de acordo com a ABNT NBR 6405:

- Rugosidade média (R_a) - parâmetro calculado efetuando-se a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média de medição (l_m). A FIGURA 17 e a Equação 01 demonstram esta medição. A TABELA 14 apresenta os valores mínimos de comprimento.

FIGURA 17 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DE R_a



Fonte: MARQUES (2003).

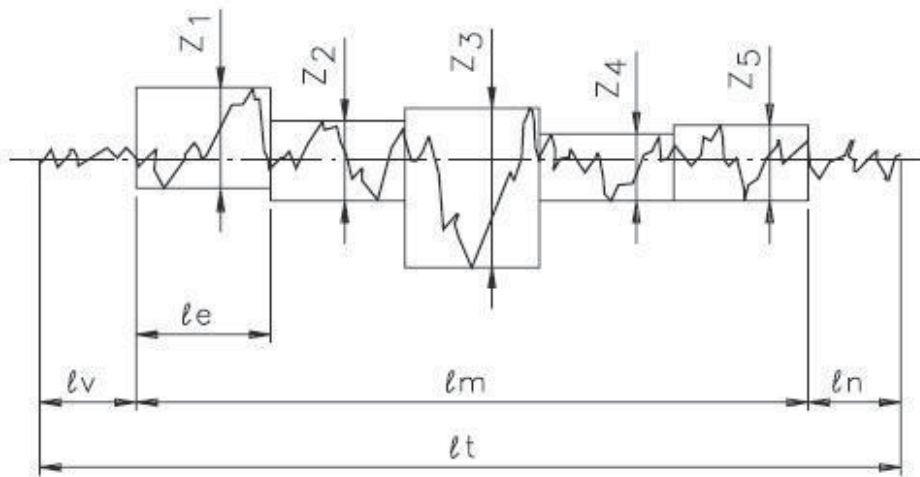
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{Eq. 01})$$

TABELA 14 - VALORES DE RA PARA COMPRIMENTOS MÍNIMOS DE AMOSTRAGEM (ABNT NBR 6405)

Rugosidade Ra (μm)	Comprimento de amostragem (mm)	Percurso de medição l_m (mm)
Até 0,1	0,25	1,25
De 0,1 até 2	0,80	4,00
De 2 até 10	2,50	12,50
Acima de 10	8,00	40,00

Fonte: MARQUES (2003).

- Rugosidade máxima (R_y) - é a máxima distância ente um pico e um vale (Z_i) apresentado no percurso de medição (l_m). Para o caso da FIGURA 18, o valor da rugosidade R_y que esta compreendida entre (l_m) tem a somatória da máxima altura e a máxima profundidade no trecho Z_3 .
- Rugosidade média (R_z) - é a media aritmética de 5 valores da rugosidade parcial Z , definida como à soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existente num comprimento de amostragem (l_e), como mostrado na FIGURA 18 e matematicamente pela Equação 02.

FIGURA 18 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO EXEMPLIFICADO A MEDIÇÃO DE R_y E R_z 

Fonte: MARQUES (2003).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \text{ (Eq. 02)}$$

Conforme Lima e Trevisan (2002), de um modo geral, a rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta R_a numa faixa de 2.5 a 13 μm , entretanto se a espessura do revestimento é pequena, a faixa de rugosidade necessária estará na faixa de 1.3 μm . A força de adesão, normalmente, aumenta com a rugosidade da superfície, contudo para R_a superior a 10 μm esta melhora decresce. A melhor adesão esta associada com a rugosidade comparada a 3/4 do diâmetro das partículas do revestimento.

A obtenção desta rugosidade pode ser obtida através de jateamento abrasivo ou usinagem. O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para se obter a rugosidade adequada.

2.2.6 Pré-aquecimento do substrato

O pré-aquecimento é importante e deve estar no escopo de trabalho da preparação do substrato para a aspensão térmica, tendo como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal (PAREDES, 2012).

O pré-aquecimento favorece a redução das tensões internas influenciando na aderência do revestimento. Pelo fato da superfície estar aquecida, gerando uma dilatação, que após ser realizada a aspensão e cessado o pré-aquecimento a contração do substrato reforçará mais ainda o ancoramento mecânico (PAREDES, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Considerando a maior facilidade de encontrar evidência técnica para camadas mais espessas utilizando processo por arco elétrico, este trabalho utilizou este processo para o desenvolvimento da casca de fundição. Os processos de aspersão térmica foram executados em laboratório, utilizando dois equipamentos diferentes, um SULZER METCO ValuArc e um METALLISATION, em ambos os equipamentos, as aplicações foram feitas manualmente.

O modelo foi fabricado em alumínio a partir de uma barra de diâmetro Ø3 1/2 pol. em um torno convencional. A geometria do modelo utilizada para ambos os processos de fabricação, foi pensada para simular uma geometria de uma peça real, com adição de curvas e cantos vivos, apresentando alguma dificuldade para o método de fabricação de casca.

Uma característica importante a ser avaliada para o molde casca é a capacidade de extração do modelo pós-processo de aspersão. Foram feitas tentativas de extração com e sem aplicação de pré-aquecimento.

Para o desenvolvimento da caracterização da casca metálica, primeiramente foi feita a avaliação dimensional, com verificação da espessura da casca e sua constância por toda a geometria. Uma casca com o mínimo de variação dimensional proporciona troca de calor uniforme por toda a casca, característica importante metalurgicamente. Outra característica dimensional avaliada foi à rugosidade superficial interna da casca, característica a ser verificada para garantir capacidade de se obter produto de fundição com tolerâncias dimensionais precisas e diminuir possibilidade de redução de resistência à fadiga. A rugosidade superficial do produto de fundição esta diretamente relacionada à rugosidade superficial do molde, na superfície de contato com o metal líquido. A rugosidade do molde casca por sua vez depende da rugosidade do modelo revestido. Para verificar a dependência da qualidade superficial da casca para com o modelo, um estudo com avaliação visual de imperfeições foi realizado. A proposta de processo de fundição mesclado, ao que se relaciona a vida útil do molde casca, em caráter comparativo considerando desgaste de um molde fundição, teve um processo de avaliação de dureza superficial interna da casca.

Com o objetivo de conferir resistência a oxidação, foram utilizados um arame de aço inoxidável 304L, o de menor custo da gama de aços austeníticos, e um

arame de alumínio ER4043, também de menor custo e com bastante facilidade de se encontrar no mercado. Foram depositados aço 304L e alumínio ER4043 na forma de arames de diâmetro Ø1,6 mm no modelo usinado de alumínio, variando no modelo os parâmetros de processo de pré-aquecimento e aplicação de desmoldante. Para o processo de aspersão, as duas máquinas foram configuradas com parâmetros fixos de corrente, tensão e pressão de ar. Os parâmetros utilizados para cada máquina são parâmetros *standard* comumente utilizados em experimentos com arames de aço e alumínio e não foram variados com o objetivo de verificar a atuação do pré-aquecimento e do desmoldante para a fabricação e remoção das cascas.

A TABELA 15 apresenta os parâmetros fixos e variados para as máquinas de aspersão térmica por arco elétrico SULZER METCO e METALLISATION utilizadas para os experimentos.

TABELA 15 - PARÂMETROS DE ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO PARA OS EXPERIMENTOS COM O MODELO USINADO DE ALUMÍNIO

Parâmetros Aspersão Térmica por Arco Elétrico				
Parâmetro	SULZER METCO ValuArc			METALLISATION
	1	2	3	4
Corrente	80 A	←	←	160 A
Tensão	32 V	←	←	←
Pressão de ar	51 Psi	←	←	85,6 Psi
Aplicação de desmoldante	Sim	Não	Sim	←
Pré-aquecimento 120°C	Não	Sim	←	←
Distância de aplicação	150 mm	←	←	←

Fonte: O AUTOR (2022).

O equipamento de aspersão térmica por arco elétrico SULZER METCO ValuArc utiliza a fonte SULZER METCO LCARE ValuArc com as especificações de acordo com a TABELA 16. O equipamento conta com uma unidade de controle SULZER METCO ValuArc LCACE e um alimentador de arames SULZER METCO LCAD. O equipamento e seus módulos são mostrados na Figura 19.

TABELA 16 - ESPECIFICAÇÃO FONTE LCARE VALUARC

Tensões primárias	200/380/440 V
Amperes	42/28/24 A
3 Fase	50~60 Hz
Tensão Secundária	32 V
Range de Voltagem	10~50 V

Fonte: O AUTOR (2022).

FIGURA 19 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO SULZER METCO VALUARC



Fonte: O AUTOR (2022).

O equipamento de aspersão térmica por arco elétrico METALLISATION utiliza uma fonte METALLISATION S250(16)-PLC (Figura 20) com as especificações de acordo com a Tabela 17. O equipamento conta com uma pistola METALLISATION ARC140 (Figura 21) e um alimentador de arames também do fabricante METALLISATION (Figura 22). O equipamento e seus módulos são mostrados na Figura 23.

FIGURA 20 - FONTE DE ASPERSÃO METALLISATION S250(16)-PLC



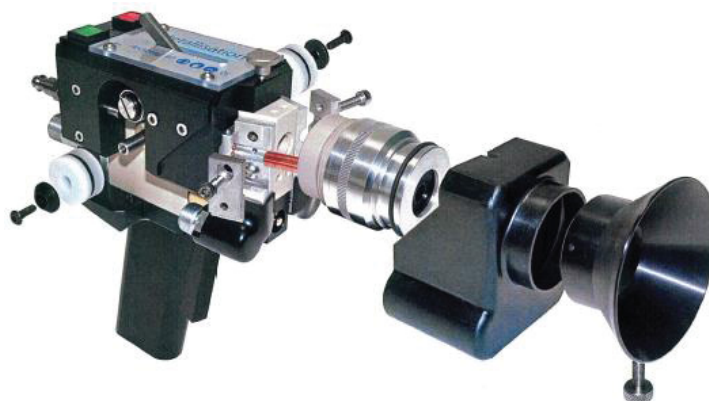
Fonte: METALLISATION DATA SHEET (2016).

TABELA 17 - ESPECIFICAÇÃO FONTE S250(16)-PLC

Tensões primárias	200/220/380/415 V
Amperes	44/40/23/21 A
3 Fase	50~60 Hz
Ar requisitado	1,28 m ³ /min
Pressão de Ar	30 Psi

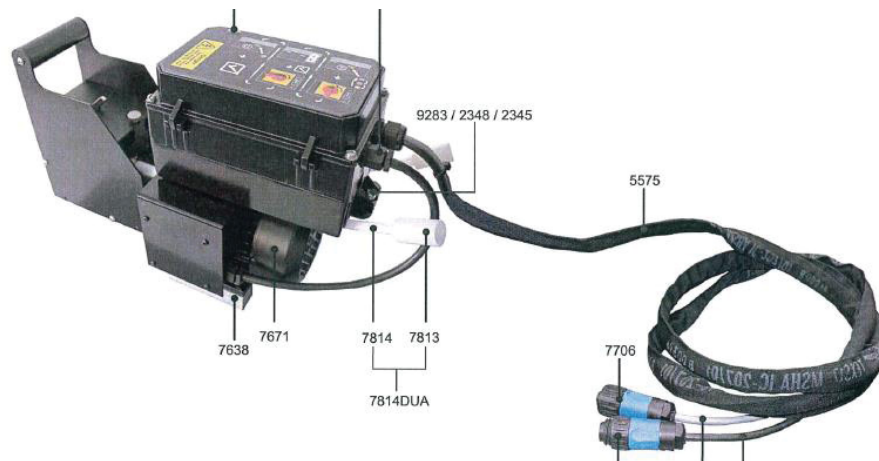
Fonte: Adaptado METALLISATION DATA SHEET (2016).

FIGURA 21 - PISTOLA DE ASPERSÃO METALLISATION ARC140



Fonte: METALLISATION DATA SHEET (2016).

FIGURA 22 - ALIMENTADOR ARAMES DE ASPERSÃO METALLISATION



Fonte: METALLISATION DATA SHEET (2016).

FIGURA 23 - EQUIPAMENTO DE ASPERSÃO METALLISATION



Fonte: METALLISATION DATA SHEET (2016).

3.1 ASPERSÃO EM MODELO FABRICADO COM PROCESSO DE USINAGEM

Foi fabricado um modelo de alumínio em uma empresa de usinagem de acordo com a FIGURA 24.

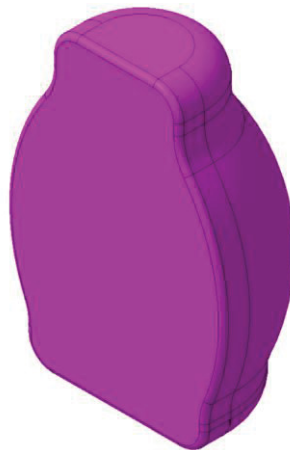
FIGURA 24 - MODELO EM ALUMÍNIO



Fonte: O AUTOR (2022).

O modelo a ser fabricado foi simplificado para não haver necessidade de operação em fresadora, apenas em torno manual, diminuindo o custo do modelo. O modelo geométrico 3D e projeto 2D foram desenvolvidos no software CATIA, como mostrado nas FIGURA 25 e no APÊNDICE A.

FIGURA 25 - MODELO 3D PARA FABRICAÇÃO EM TORNO MANUAL



Fonte: O AUTOR (2022).

Para facilitar a extração da casca, foi utilizado um desmoldante do fabricante CLARUS, modelo 6400, composto desenvolvido para extração de peças forjadas e fundidas sob pressão. O desmoldante CLARUS 6400 é um produto sintético, a base

de água e é aditivado com grafite coloidal, garantindo especificação em temperaturas de até 1000 °C. Embalagem do desmoldante na FIGURA 26.

FIGURA 26 - DESMOLDANTE CLARUS 6400



Fonte: O AUTOR (2022).

O modelo de alumínio foi primeiramente revestido com processo por arco elétrico, utilizando arames de aço inoxidável 304L de diâmetro Ø1,6 mm e composição química de acordo com a TABELA 18. O parâmetro 1 da TABELA 15 foi utilizado.

TABELA 18 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE AÇO AISI304L

Ferro (Fe)	Restante (%)
Carbono (C)	0,03 máx.
Cromo (Cr)	18 ~ 20
Níquel (Ni)	8 ~ 12
Manganês (Mn)	2 máx.
Fósforo (P)	0,045 máx.
Enxofre (S)	0,03 máx.
Silício (Si)	1,00 máx.

Fonte: SID AÇO INOX (2022).

Foi extraída a casca de aço 304L do modelo de alumínio e após a limpeza da superfície, foi executado um novo processo de aspensão com o parâmetro 2 da TABELA 15.

Novamente extraída a casca de aço 304L, foi aplicado desmoldante e aplicado um processo utilizando arame de alumínio. A liga utilizada foi o alumínio ER4043, com composição química de acordo com a TABELA 19.

TABELA 19 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE ALUMÍNIO ER4043

Alumínio	Restante (%)
Berílio	0,0008 máx.
Cobre	0,30 máx.
Ferro	0,80 máx.
Magnésio	0,05 máx.
Manganês	0,05 máx.
Silício	4,5 ~ 6,0
Titânio	0,20 máx.
Zinco	0,10 máx.
Outros elementos	0,05 máx. cada & 0,15 máx.

Fonte: PINNACLE ALLOYS (2021).

O processo foi executado com o parâmetro 3 da TABELA 15.

Após a limpeza do modelo, novamente utilizando arames de alumínio ER4043, porém com os parâmetro 2 da TABELA 15, um novo processo de aspensão foi aplicado ao modelo.

Após a retirada da casca de alumínio ER4043, foi aplicado desmoldante novamente (FIGURA 27) no modelo de alumínio. A peça com aplicação de desmoldante foi submetida ao processo de aspensão térmica com o equipamento METALLISATION em aplicação manual, utilizando arames de alumínio de diâmetro Ø1,6 mm com o parâmetros 4 da TABELA 15.

FIGURA 27 - MODELO DE ALUMÍNIO COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE



Fonte: O AUTOR (2022).

3.2 MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CASCA

As medições de espessura das cascas foram medidas utilizando um micrômetro Mitutoyo 103-137.

Após o processo de aspensão térmica, durante a retirada da casca, as bordas tendem a romper até que a casca seja extraída por inteira. As bordas da casca já retirada foram medidas de modo a se obter um valor mínimo de espessura para o qual casca pode ser removida sem romper. Essa espessura foi determinada para as regiões com curvaturas de raios grandes e pequenos.

3.3 CAPACIDADE DE CÓPIA DA SUPERFÍCIE DO MODELO E MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL INTERNA

Para verificar a dependência da qualidade superficial da casca com o modelo, e garantir que os produtos de fundição utilizando o molde tipo casca metálica tenham a rugosidade semelhante a da superfície do molde e por consequência do modelo, foi avaliado a capacidade da casca em copiar a superfície do modelo. Foi feita avaliação visual com auxílio de um microscópio estereoscópico do fabricante OLYMPUS modelo SZX10.

As rugosidades internas da casca de aço 304L foram medidas com o rugosímetro Mitutoyo SJ210, utilizando um detector padrão Mitutoyo No.178-296 de extremidade agulha cônica (FIGURA 28). O detector utilizado não possui restrição quanto à medição de superfícies com curvatura.

FIGURA 28 - DETECTOR DE RUGOSÍMETRO MITUTOYO NO.178-296



Fonte: O AUTOR (2022).

3.4 MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL INTERNA

Foram medidas as durezas das superfícies internas das cascas de alumínio e de aço 304L. As medições foram feitas com o durômetro Maekawa HR-100E.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As cascas geradas por aspersão térmica são primeiramente apresentadas e caracterizadas de acordo com a facilidade de extração e as quebras resultantes do procedimento.

Em seguida, é apresentada a avaliação dimensional da espessura das cascas, resultados de medições da rugosidade e da dureza superficial interna.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM 304L COM DESMOLDANTE

O resultado do primeiro experimento, utilizando arames de aço 304L de diâmetro $\varnothing 1,6$ mm, com aplicação de desmoldante, com o parâmetro 1 da TABELA 15, é mostrado na FIGURA 29.

FIGURA 29 - CASCA DE AÇO 304L GERADA COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE



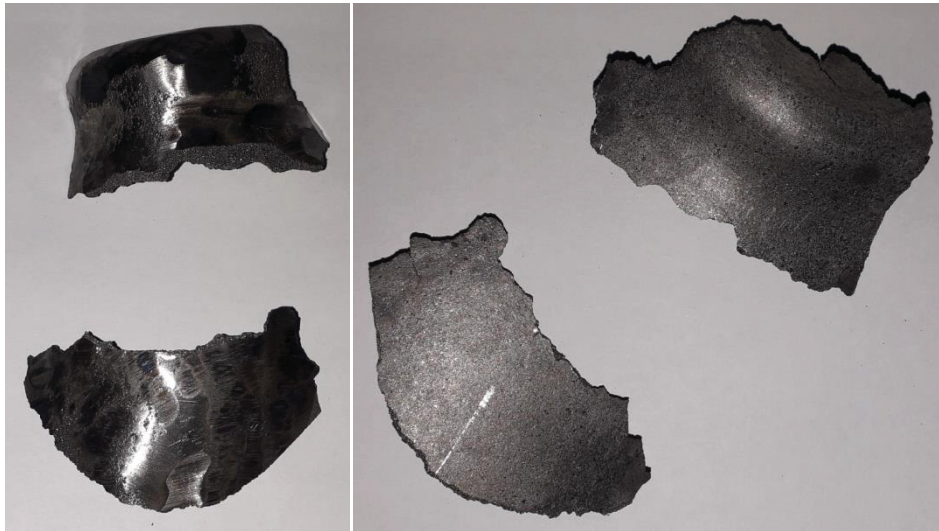
Fonte: O AUTOR (2022).

A configuração do experimento não apresentou resultado satisfatório, visto que o revestimento não teve aderência suficiente para construir camadas e sobre camadas, se desfazendo durante o processo. Possivelmente a falta de aderência foi devido a não aplicação de pré aquecimento no modelo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM 304L SEM DESMOLDANTE

O segundo experimento com o modelo de alumínio, utilizou o mesmo arame de aço, no entanto, sem aplicação de desmoldante. Os parâmetros estão de acordo com a TABELA 15. A FIGURA 30 apresenta o resultado do processo.

FIGURA 30 - CASCA DE AÇO 304L GERADA SEM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE



Fonte: O AUTOR (2022).

Utilizando o parâmetro 2 da TABELA 15, sem aplicação de desmoldante, foi possível obter uma casca sem rupturas e com presença de sobre camada. Porém, devido à ausência de desmoldante, a retirada da casca só foi possível com uso de ferramentas, o que provocou o rompimento parcial da casca. É possível verificar na FIGURA 30 que na região inferior da casca, foi retirada sem rompimento e copiou a curvatura do modelo.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 COM DESMOLDANTE

Com o parâmetro 3 da TABELA 15, mudando os arames de aço 304L para arames de alumínio ER4043 de diâmetro $\varnothing 1,6$ mm com composição química de acordo com a TABELA 19, também com aplicação manual, foi realizado novo processo de aspersão térmica por arco elétrico no modelo de alumínio usinado com aplicação de desmoldante, com resultado de acordo com a FIGURA 31.

FIGURA 31 - CASCA DE ALUMÍNIO ER4043 GERADA COM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE



Fonte: O AUTOR (2022).

Com resultado ao que se assemelha ao obtido com aplicação dos arames de aço 304L, onde o revestimento não permitiu aderência e não foi possível obter sobre camada e a casca teve rompimento durante o processo, também não foi possível à construção da casca utilizando o alumínio ER4043, no entanto, o efeito de quebra do revestimento foi muito mais acentuado, como é possível notar na FIGURA 31.

O rompimento dos revestimentos utilizando alumínio, fabricados no equipamento SULZER METCO VALUARC, ocorreu devido à baixa eficiência de deposição. O equipamento de aspersão térmica apresentou problemas de configuração com um material mais dúctil em relação ao aço. O conjunto de roldanas, engrenagens e folgas do dispositivo de alimentação de arame é provavelmente o causador do baixo desempenho com arames de alumínio.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 SEM DESMOLDANTE

A 4ª aplicação de revestimento por arco elétrico, com o equipamento SULZER METCO VALUARC, utilizou os arames de alumínio ER4043 com o parâmetro 2 da TABELA 15. Aplicando pré-aquecimento sem a presença de desmoldante, foi possível ter uma casca com sobre camada de alumínio, no entanto, a extração danificou o revestimento. É possível verificar que mesmo com o

rompimento da casca nas extremidades, foi possível gerar casca nas regiões de curvatura, como mostrado na FIGURA 32.

FIGURA 32 - CASCA DE ALUMÍNIO ER4043 GERADA SEM APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE



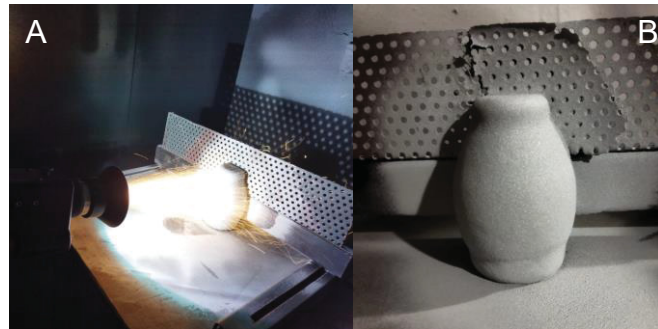
Fonte: O AUTOR (2022).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA EM ER4043 COM DESMOLDANTE EM APLICAÇÃO COM EQUIPAMENTO METALLISATION

Para verificar a possibilidade de aplicação de revestimentos de alumínio no modelo de alumínio com aplicação de desmoldante, o experimento foi novamente executado, porém, com equipamento METALLISATION, que contava com configuração de maior eficiência de deposição e um sistema de alimentação de arame que permite uma melhor estabilidade do processo quando se utiliza arames dúcteis.

Utilizando o parâmetro 4 da TABELA 15, com o equipamento METALLISATION, também em aplicação manual, no entanto, com equipamento ajustado para aplicação de revestimento por aspensão térmica com arame de alumínio, foi obtido uma casca uniforme, mesmo com a aplicação do desmoldante. Procedimento realizado de acordo com a FIGURA 33 A e o resultado de acordo com a FIGURA 33 B.

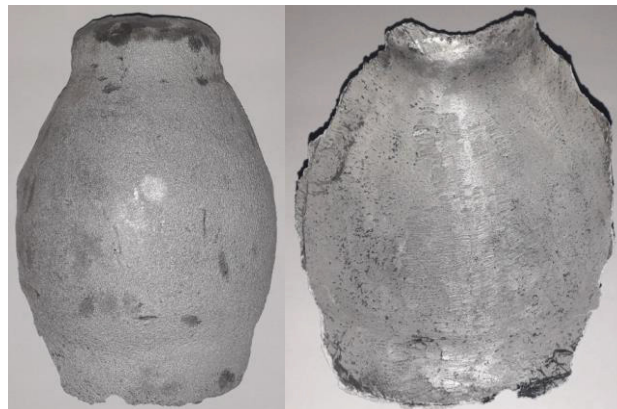
FIGURA 33 - A) ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO NO MODELO DE ALUMÍNIO. B) MODELO COM APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO



Fonte: O AUTOR (2022).

Foi retirada a casca de alumínio do modelo, com quebras devido à sollicitação mecânica, no entanto, em comparação aos demais experimentos, foi o processo onde ocorreu o rompimento menos acentuado, como mostra a FIGURA 34.

FIGURA 34 - CASCA DE ALUMÍNIO GERADA NO EQUIPAMENTO METALLISATION APÓS EXTRAÇÃO DO MODELO



Fonte: O AUTOR (2022).

Ao comparar o modelo de alumínio usinado (FIGURA 24) e a casca de alumínio extraída (FIGURA 34) é possível verificar que a superfície interna da casca copiou perfeitamente a superfície externa do modelo, característica que é validada quantitativamente pela medição de rugosidade de ambas as superfícies.

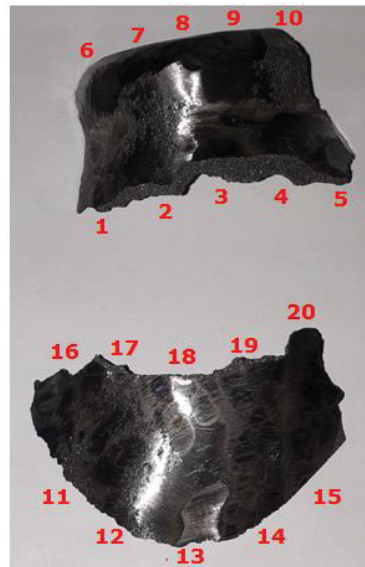
4.6 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA DA CASCA

Os experimentos utilizando liga de aço 304L com aplicação de desmoldante e os experimentos com liga de alumínio ER4043 com e sem desmoldante, por terem

apresentado um resultado de casca quebradiça ou sem sobre-camada, não foram avaliados.

A FIGURA 35 apresenta os pontos onde foram medidas às espessuras da casca de aço inoxidável 304L no 2º processo de aspensão térmica por arco elétrico, com o parâmetro 2 da TABELA 15 em aplicação sem desmoldante. A TABELA 20 apresenta os resultados.

FIGURA 35 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE AÇO 304L



Fonte: O AUTOR (2022).

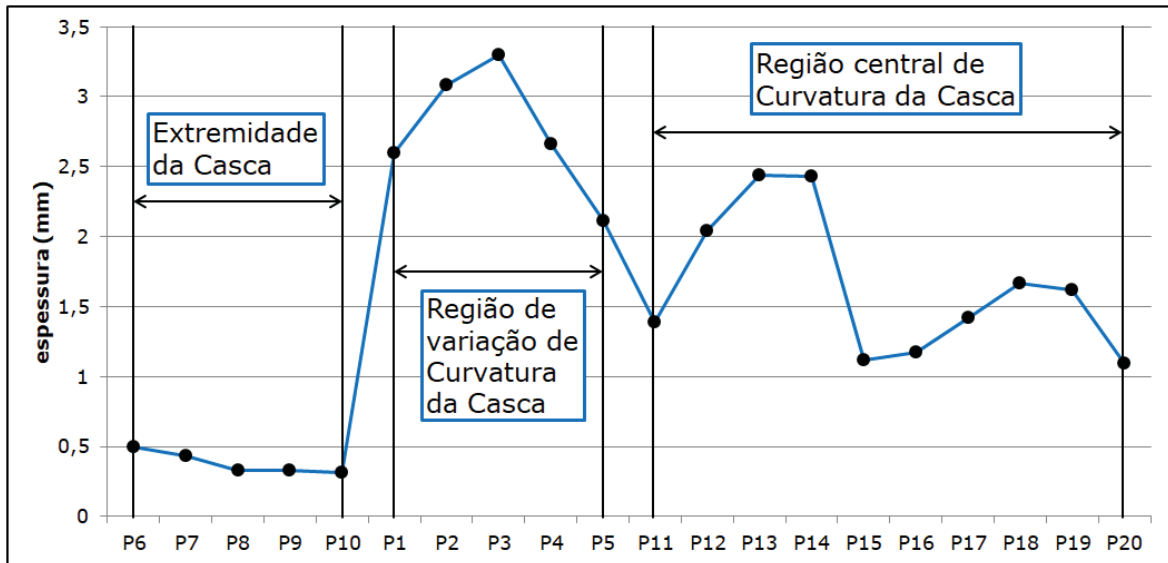
TABELA 20 - ESPESSURAS MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L

Espessuras casca de aço 304L (mm)			
1	2,60	11	1,39
2	3,08	12	2,04
3	3,30	13	2,44
4	2,66	14	2,43
5	2,11	15	1,12
6	0,50	16	1,17
7	0,43	17	1,42
8	0,33	18	1,67
9	0,33	19	1,62
10	0,31	20	1,09
Média	1,60	σ	0,9536

Fonte: O AUTOR (2022).

Com os resultados de medição da espessura da casca de aço 304L, apresentados na TABELA 20, e com o gráfico mostrado na FIGURA 36, é possível notar a tendência de que para um mesmo material, existe formação de casca em diferentes espessuras.

FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURAS DA CASCA DE 304L NO MODELO DE ALUMÍNIO

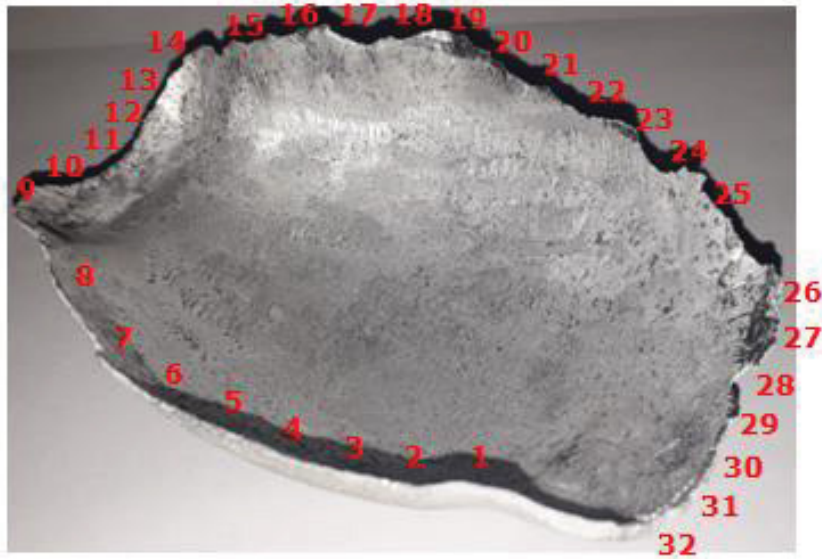


Fonte: O AUTOR (2022).

Considerando os rompimentos de extremidade da casca de aço 304L, extremidades medidas nos pontos P6, P7, P8, P9 e P10, a espessura mínima média para remoção de casca é de 0,38 mm.

Com a referência da FIGURA 37 e FIGURA 38, a TABELA 21 apresenta os resultados das medições da casca de alumínio gerada no 5º processo de aspersão térmica, com o parâmetro 4, executado no equipamento METALLISATION em aplicação com desmoldante.

FIGURA 37 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE ALUMÍNIO



Fonte: O AUTOR (2022).

FIGURA 38 - PONTOS ONDE FORAM MEDIDAS AS ESPESSURAS DA CASCA DE ALUMÍNIO CORTADA



Fonte: O AUTOR (2022).

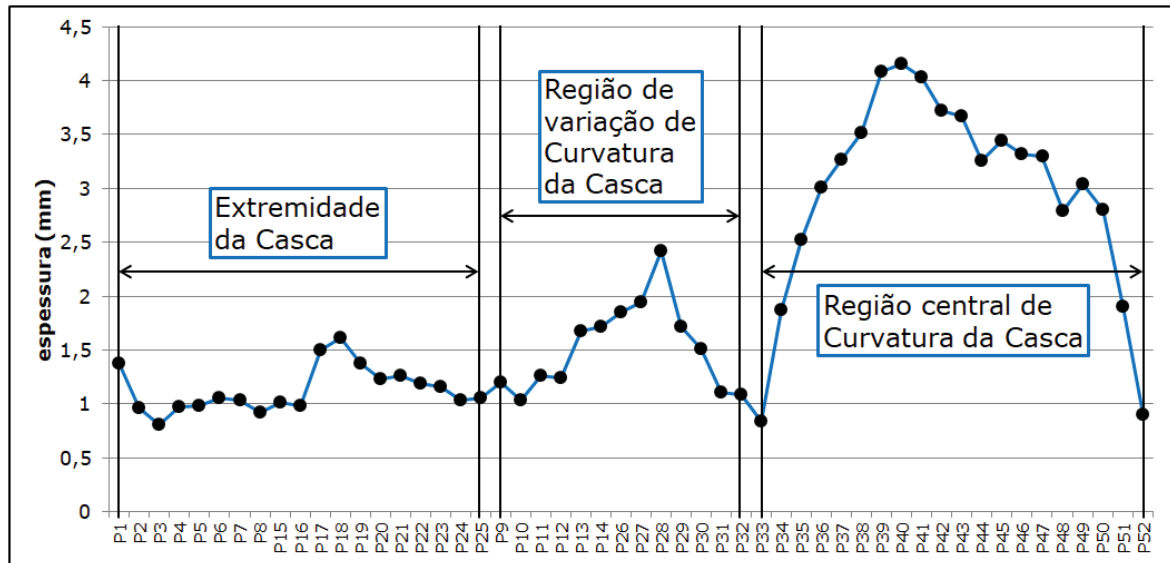
TABELA 21 - ESPESSURAS MEDIDAS DA CASCA DE ALUMÍNIO

Espessuras casca de alumínio (mm)							
Extremidades da casca				Centro da casca			
1	1,38	17	1,50	33	0,838	49	3,035
2	0,96	18	1,61	34	1,876	50	2,804
3	0,81	19	1,38	35	2,523	51	1,907
4	0,97	20	1,23	36	3,009	52	0,904
5	0,98	21	1,26	37	3,268		
6	1,06	22	1,19	38	3,513		
7	1,04	23	1,16	39	4,08		
8	0,92	24	1,04	40	4,159		
9	1,20	25	1,06	41	4,031		
10	1,04	26	1,85	42	3,722		
11	1,26	27	1,94	43	3,666		
12	1,24	28	2,42	44	3,259		
13	1,68	29	1,72	45	3,444		
14	1,72	30	1,51	46	3,318		
15	1,01	31	1,11	47	3,3		
16	0,98	32	1,09	48	2,788		
Média	1,29125	σ	0,3594	Média	2,9722	σ	0,9501

Fonte: O AUTOR (2022).

Considerando os rompimentos de extremidade da casca de alumínio, extremidades medidas nos pontos P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23, P24 e P25, a espessura mínima média para remoção de casca é de 1,1337 mm. Distribuição das espessuras em suas respectivas regiões é mostradas na FIGURA 39. Avaliando os pontos P1 ~ P32 e os pontos P33 ~ P52 da região central da casca de alumínio é possível notar uma diferença significativa entre as espessuras da casca, isto se deve ao fato do processo de aspersão ter sido executado de maneira manual (FIGURA 33), sem auxílio de um robô, portanto sem controle de volume de deposição de material. As diferenças entre as regiões das extremidades e centrais para a casca de aço 304L também se explicam pela aplicação manual.

FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURAS DA CASCA DE ER4043 NO MODELO DE ALUMÍNIO



Fonte: O AUTOR (2022).

Em comparação com a casca de aço 304L, avaliando a casca inteira, é possível verificar que para gerar uma casca com capacidade de extração, na média o alumínio necessita de espessuras maiores do que para o aço inoxidável. Também se nota uma tendência de as extremidades da casca de aço 304L possuir menor espessura, característica que é esperada devido a maior resistência mecânica do aço.

Outra importante característica verificada na medição de espessura da casca de aço 304L é a diferença de espessuras entre as regiões simples e as regiões de curvatura. Para a região de curvatura pouco acentuada (maior raio), nos pontos de medição P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19 e P20, a média foi de 1,64 mm, já para a região de curvatura, nos pontos P1, P2, P3, P4 e P5, a média foi de 2,75 mm, aproximadamente 67,68% maior.

4.7 CAPACIDADE DE CÓPIA DA SUPERFÍCIE DO MODELO

Com o auxílio do microscópio, foram geradas imagens de uma mesma região (FIGURA 40) escolhida do modelo pela presença de defeitos superficiais e consequentemente maior facilidade de identificar a capacidade de cópia da superfície.

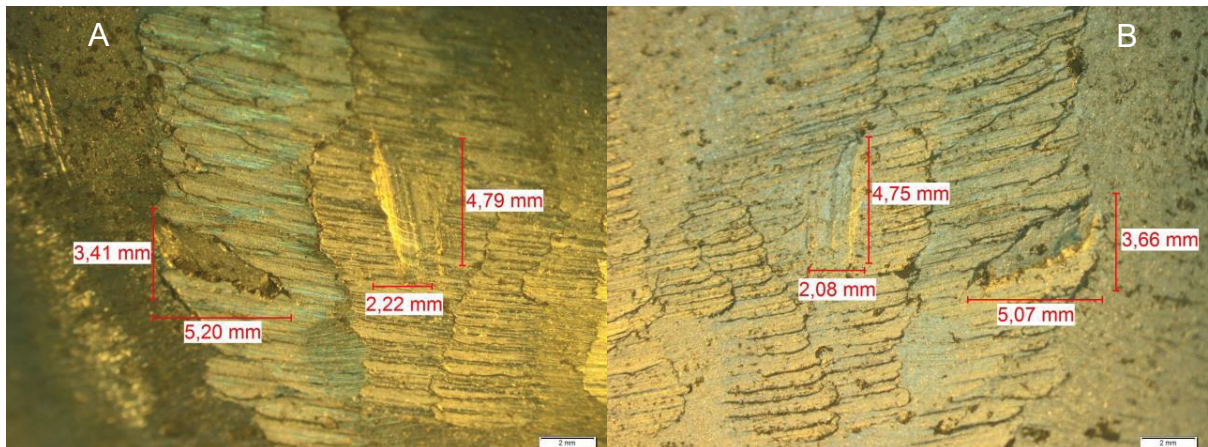
FIGURA 40 - REGIÃO ESCOLHIDA PARA ANÁLISE DE COPIA DE SUPERFÍCIE



Fonte: O AUTOR (2022).

A FIGURA 41 A mostra a região de análise da FIGURA 40 com zoom 6,3x e a FIGURA 41 B mostra a mesma região, porém na casca de alumínio.

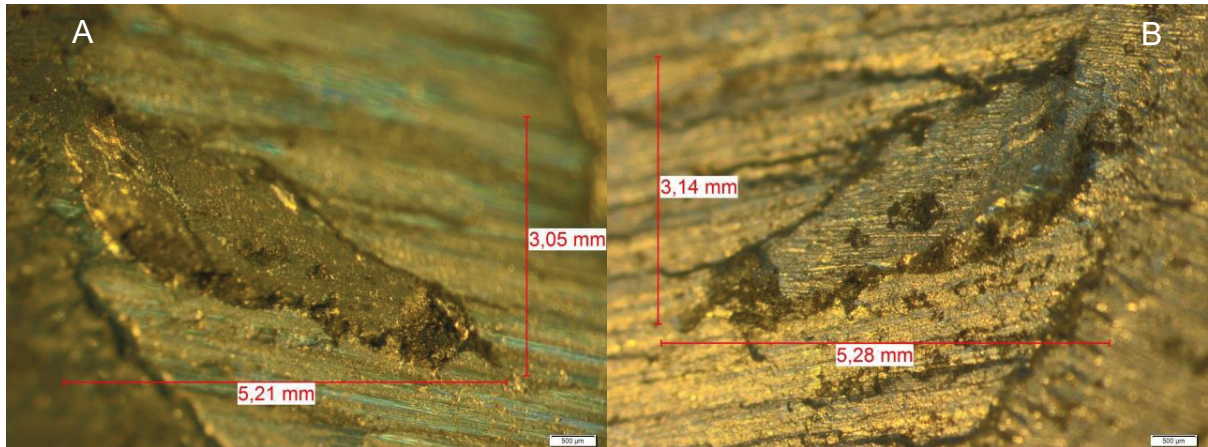
FIGURA 41 - A) REGIÃO PARA ANÁLISE INDICADA NA FIGURA 40 ZOOM 6,3X; B) REGIÃO ESPELHO NA CASCA DE ALUMÍNIO



Fonte: O AUTOR (2022).

A FIGURA 42 A mostra a região de análise da FIGURA 40 com zoom 200x e a FIGURA 42 B mostra a mesma região, porém na casca de alumínio.

FIGURA 42 - A) REGIÃO PARA ANÁLISE INDICADA NA FIGURA 40 ZOOM 200X; B) REGIÃO ESPELHO NA CASCA DE ALUMÍNIO



Fonte: O AUTOR (2022).

A partir de análise visual e quantitativa das imagens geradas com auxílio de microscópio, é possível verificar que a casca fabricada apresentou grande capacidade de copiar a superfície do modelo.

4.8 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL INTERNA

As medições de rugosidade da casca de aço inoxidável 304L no 2º processo de aspersão térmica por arco elétrico, aplicação sem desmoldante, são apresentadas na TABELA 22. O processo mecânico, com uso de ferramentas, para retirada das cascas nas aplicações executadas no modelo de alumínio, causou danos à superfície do modelo, impossibilitando a medição de rugosidade.

TABELA 22 - RUGOSIDADES MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L

Rugosidades casca de aço inoxidável 304L			
	Ra	Rt	Rz
1	2,695	28,692	18,921
2	3,094	25,965	19,861
3	3,048	35,156	19,871
4	3,476	36,098	23,206
5	2,195	27,120	16,276
6	3,331	38,718	22,964
7	4,672	44,661	27,267
8	3,800	38,667	27,020
9	3,771	33,993	25,108
10	3,405	36,464	20,669
Média	3,349	34,553	22,116
σ	0,672	5,836	3,621

Fonte: O AUTOR (2022).

De acordo com a TABELA 4 apresentada na revisão e considerando como alta, a capacidade de cópia da superfície de produtos fundidos com a superfície interna do molde, é possível concluir que o processo mesclado em desenvolvimento fabrica peças com acabamento superficial semelhante ao processo *Shell Molding* (fundição por casca) (Ra: 2,114 ~ 4,229).

4.9 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL INTERNA

A dureza das superfícies internas das cascas de aço 304L e da casca de alumínio foram medidas. A TABELA 23 apresenta as medições de dureza da casca de 304L.

TABELA 23 - DUREZAS MEDIDAS DA CASCA DE AÇO 304L

Dureza aço inoxidável 304L (HrC)	
1	14
2	16,5
3	17
4	17
5	18
6	14
Média	16,08

Fonte: O AUTOR (2022).

A TABELA 24 apresenta as medições de dureza da casca de alumínio.

TABELA 24 - DUREZAS MEDIDAS DA CASCA DE ALUMÍNIO

Dureza alumínio (HrB)	
1	17
2	18
3	25,5
4	18,5
5	18,5
Média	19,5

Fonte: O AUTOR (2022).

Moldes permanentes fabricados a partir de liga H13, com capacidade de fabricação em torno de 800.000 peças, possuem dureza de 45 HrC. A casca fabricada a partir de aço 304L, apresentou dureza média de 16,08 HrC, 64,27% menor.

4.10 ESTIMATIVA DE CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO PROPOSTO

Com base nas medições das cascas e na revisão bibliográfica, aonde é apresentado às características dos processos de fundição por casca e por gravidade utilizando moldes metálicos permanentes. É possível criar uma estimativa para as características da tecnologia de fundição mesclada em desenvolvimento, de acordo com a TABELA 25.

TABELA 25 - ESTIMATIVA DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO MESCLADO EM DESENVOLVIMENTO

	Shell Molding	Molde Permanente	Novo Processo
Tolerância dimensional	±0,25 mm ±5 mm	±2,5 mm ±7,5 mm	N/A
Custo relativo (grande quantidade)	Médio Alto	Baixo	Baixo
Custo relativo (pequena quantidade)	250 lb	Alto	Baixo
Peso fundido	2,5 mm	100 lb	N/A
Espessura mínima	Bom	3,2 mm	Sem limitação
Acabamento superficial relativo	Bom Ra ≈ 2,114 ~ 4,229	Bom	Bom Ra ≈ 2,195 ~ 4,672
Facilidade de fundição de peça complexa	Bom	Razoável	N/A (trabalhos futuros)
Espessura mínima de processo	N/A	N/A	0,38 (aço) 1,1337 (alumínio)
Facilidade de alteração de projeto	Razoável	Ruim	Ótimo
Ligas que podem ser fundidas	Ilimitada	Melhor Base Al e Cu	Necessário estudo de deposição com matérias primas de maior resistência mecânica.

Fonte: O AUTOR (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após variação dos parâmetros da fonte de energia do processo de aspersão térmica por arco elétrico e também executando experimentação com e sem aplicação de desmoldante e pré-aquecimento no modelo usinado de alumínio, os experimentos apresentados demonstraram viabilidade técnica para fabricação de uma casca de geometria com curvaturas de raios grandes e pequenos, concluindo uma primeira etapa para o desenvolvimento de um novo processo de fundição, que mescla moldes permanentes e moldes do tipo casca.

Os experimentos geraram três cascas, uma de aço 304L, fabricada sem aplicação de desmoldante, uma de alumínio fabricada em aplicação manual com o equipamento SULZER METCO VALUARC e uma de alumínio fabricada também em aplicação manual, mas com equipamento METALLISATION. A casca de alumínio fabricada com o VALUARC apresentou muitas quebras na extração. A casca de alumínio fabricada no METALLISATION apresentou maior facilidade de extração e foi possível extrair do modelo com poucas quebras nas extremidades. A casca de aço 304L apresentou maior dificuldade de extração, rompendo em duas partes.

A casca de alumínio se manteve sem quebras durante a extração mesmo em regiões pouca espessas. A casca de aço 304L, embora quebradiça, apresentou formação de sobrecamada em diferentes tipos de espessura.

Visto que apenas a casca fabricada com aplicação de desmoldante, apresentou facilidade de extração, é possível concluir que o desmoldante se situa como importante característica de processo para fabricação de um molde tipo casca.

Para a casca de aço inoxidável 304L, a espessura mínima média para remoção de casca foi de 0,38 mm. Já para a casca de alumínio, a espessura mínima média para remoção de casca é de 1,1337 mm. Diferença esperada devido ao aço possuir maior resistência mecânica que o alumínio e necessitar de menos espessura para construir uma casca com capacidade de extração do modelo.

Tanto para ambas as cascas de aço 304L, quanto para casca de alumínio, foi possível notar como a superfície interna da casca tem a característica de copiar a superfície do modelo aspergido, comportamento observado a partir de imagens e medições das imperfeições do modelo e das cascas com auxílio de um instrumento óptico. A capacidade da casca de copiar a superfície aspergida apresenta o acabamento superficial do modelo, como sendo um parâmetro importante do

processo, considerando que uma superfície interna de casca pode produzir um produto de fundição com bom acabamento e com tolerâncias dimensionais precisas.

Além da grande possibilidade de se obter um produto de fundição de bom acabamento superficial pela capacidade de cópia da superfície do modelo, a medição de rugosidade das cascas indica comparativamente que o processo em desenvolvimento poderia gerar produtos de fundição com rugosidade semelhante ao do processo de fundição por casca, pois em média, a casca de aço 304L apresentou rugosidade Ra de 3,349 e em média, os moldes de fundição por casca possuem rugosidade Ra 3,172. Portanto a combinação das características obtidas apresenta um processo com grandes possibilidades de competitividade em relação à qualidade superficial de peças fundidas.

Com as medições de dureza das superfícies internas das cascas de aço 304L e de alumínio é possível situar um possível novo processo de fundição utilizando moldes de casca metálica entre o processo por casca e o processo com moldes permanentes em relação ao desgaste e conseqüentemente a durabilidade do molde. A tecnologia de aspersão térmica permite variar a matéria prima dos arames, abrindo a possibilidade de aspergir materiais de maior dureza em relação aos materiais utilizados, portanto, o processo em desenvolvimento pode ter grandes resultados em durabilidade do molde e resistência ao desgaste.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de redução de custo do modelo a ser aspergido para a construção de um molde tipo casca metálica, é recomendado à continuidade do estudo de fabricação do modelo utilizando materiais poliméricos, porém é necessário um estudo de materiais poliméricos que possuam resistência térmica para suportar um processo de aspersão.

Um estudo de extrema importância para a linha de pesquisa é a aplicação de diferentes tipos de desmoldantes, variando composição química, viscosidade, quantidade e distribuição de aplicação. A avaliação do estudo é a otimização da extração da casca.

A aplicação de materiais de maior resistência mecânica por aspersão térmica gera a oportunidade de se estudar o aumento de durabilidade de moldes tipo casca com a utilização de matérias primas mais nobres.

A capacidade de extração da casca é uma característica de processo extremamente importante para a fabricação da casca metálica e também necessita de um estudo mais aprofundado.

Considerando a possibilidade de que para a extração, as quebras das bordas das cascas sejam uma característica inalterável do processo, é necessário estudar e definir dimensões de sobrematerial para diferentes tipos de matéria prima para que as quebras de borda da casca extraída respeitem as dimensões do modelo.

Softwares de simulação por elementos finitos podem contribuir para o estudo de fabricação de casca, no sentido de otimizar a espessura do revestimento, avaliando integridade do molde e a transferência de calor necessária para a solidificação do produto de fundição de maneira a produzir uma microestrutura que atenda posteriores processos metalúrgicos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6405/1988 Rugosidade de Superfícies, Norma ABNT, 1988.
- ASM, American Society for Metals. Thermal Spray Coatings, Surface Engineering, ASM Handbook, 1994.
- AWS, American Welding Society, Inc. Thermal Spraying. Practice, Theory, and Applications, 1985.
- BUTLER, W. A.; TIMELLI, G.; BATTAGLIA, E.; BONOLLO, F., Die Casting (PermanentMold). Módulo Referência (Materials Science and Materials Engineering) - General Motors, Bloomington, Indiana, Estados Unidos da América, 2016.
- CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- COSTA, P. P. B., ESTUDO DA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE CARBONETO DE TUNGSTENIO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ E SEU DESEMPENHO NO ENSAIO DE ERSOÃO POR LAMA (SLURRY JET). Dissertação (curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- DONG, S.; IWATA, Y.; HOHJO, H.; YAMASHITA, T.; HIRANO, H., Shell Mold Cracking and Its Prediction during Casting of AC4C Aluminum Alloy*. Artigo (Japan Foundry Engineering Society) - Toyota Industries Corporation. Hekinan. 2010.
- HAMASAIID, A.; DARGUSCH, M. S.; DAVIDSON, S. T.; LOULOU, T., Effect of Mold Coating Materials and Thickness on Heat Transfer in Permanent Mold Casting of Aluminium Alloys. Artigo (METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, SPRINGER VERLAG/ASM INTERNATIONAL) - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, CROMeP, now Institute Clement Ader, 81013, Albi Cedex 09, França, 2019.
- HAMASAIID, A.; DARGUSCH, M. S.; DOUR, G., The impact of the casting thickness on the interfacial heat transfer and solidification of the casting during permanent mold casting of an A356 alloy. Artigo (JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES) - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, CROMeP, now Institute Clement Ader, 81013, Albi Cedex 09, França, 2019.
- IQBAL, M.; PATEL, S.; VIDYARTHEE, G., Shell Mold Casting Manufacture of Complex Parts with Thin Sections Experimental details. Artigo (INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY) - Department of Foundry-Forge Technology, National Institute of Foundry & Forge Technology, Hatia, Ranchi, India, 2014.

JANSEN, C. S., APLICAÇÃO DA PRODUÇÃO MAIS LIMPA COMO FERRAMENTA PARA MELHORIA CONTÍNUA DO SISTEMA DE GESTÃO DE SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE. Dissertação (curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

KURODA, S.; KAWAKITA, J.; WATANABE, M., Warm spraying—a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. Artigo (SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS) - Composites and Coatings Center, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japão. 2008.

LACERDA, F. G. B.; BRAGA, A. V. C.; BRITO, T. C.; SENNA, L. F.; CARDOSO, B. R.; FURTADO, H. C.; DINIZ, M. G., Avaliação de defeitos em revestimentos metálicos aspergidos termicamente por arco elétrico em substratos de geometrias distintas. Artigo (BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

LIMA, C. C., TREVISAN, R. Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação. São Paulo - Artliber Editora, 2002.

MALEK, M. H. A.; SAAD, N. H.; ABAS, S. K.; ROSELINA, N. R. N.; SHAH, N. M., Performance and Microstructure Analysis of 99.5% Aluminium Coating by Thermal Arc Spray Technique. Artigo (THE MALAYSIAN INTERNATIONAL TRIBOLOGY CONFERENCE) - Micro-Nano Electromechanical System Laboratory (MiNEMS), Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malásia, 2013.

MARIANO, C; PAREDES, R. S. C., Obtenção de revestimentos de nióbio depositados por aspersão térmica para proteção a corrosão marinha. Artigo (INTERCORR ABRACO 2010) - Fortaleza, 2010.

MARQUES, P. P. V., ASPERSÃO TÉRMICA¹. Artigo (<https://infosolda.com.br>) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2003.

MORIDI, A.; GANGARAJ, M. H.; VEZZU, S.; GUAGLIANO, M., Number of Passes and Thickness Effect on Mechanical Characteristics of Cold Spray Coating. Artigo (XVII INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON MECHANICAL FATIGUE OF METALS (ICMFM17)) - Politecnico di Milano - Department of Mechanical Engineering, Via G. La Masa, 1, 20156, Milão, Itália, 2014.

MORO, N.; AURAS, A. P., PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, Fundação. Apostila (Curso Técnico de Mecânica Industrial) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NUERNBERGMESSE; KARETA, N, Significance of Release Agents for Die Casting Technology. Artigo (EUROGUSS News 2020) - Nuremberg, Alemanha, 2020.

OERLIKON METCO. An Introduction to Thermal Spray. Caderno informativo do fabricante. V.6, Suíça, 2016.

OFIC, OSAKA FUJI CORPORATION. Thermal Spray, A Surface Coating Technique, OFIC Booklet, 2021.

PAREDES, R. S. C., ASPERSÃO TÉRMICA - AT. Texto Guia. (Curso de Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PAWLOWSKI, L. The science and engineering of Thermal Spray Coatings. Second edition. John Wiley e Sons, Ltd Publishing. Inglaterra, 2008.

Pinnacle Alloys, ER4043 DATA SHEET, Pinnacle Alloys SOWESCO DATA SHEETS, 2021.

QUAL a influência da temperatura na impressão 3D? 3DLAB, Betim, 18 de jun. de 2019. Disponível em: <https://3dlab.com.br/temperatura-na-impressao-3d/>. Acesso em: 28/11/2021 às 15:00.

SINGH, R.; SINGH, S.; MAHAJAN, V., Investigations for Dimensional Accuracy of Investment Casting Process after Cycle Time Reduction by Advancements in Shell Moulding. Artigo (3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation - ICMPC 2014) - Guru Nanak Dev Engineering College. Ludhiana, 2014.

SNELLING, D. A.; WILLIAMS, C. B.; DRUSCHITZ, A. P., Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds. Artigo (Additive Manufacturing) - Department of Manufacturing Engineering, Georgia Southern University, Estados Unidos, 2019.

SUCHARSKI, G., B. Deposição de revestimentos tipo barreira térmica por aspersão térmica (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SURFACE finish quality, surface smoothness of cast iron and cast steel, sand castings made in China. IRON FOUNDRY. Disponível em: <http://www.iron-foundry.com/surface-finish-quality-smoothness-cast-iron-steel-sand-castings-china.html>. Acesso em: 13 de dezembro de 2021 às 17:00.

VUORISTO, P., Thermal Spray Coating Processes. Módulo Referência (Materials Science and Materials Engineering) - Tampere University of Technology, Tampere, Finlândia, 2014.

YUNUS, M. I.; SINGH, K.; ARORA, G.; SINGARI, R. M., Comparative Study on the Effect of Nitriding and Microwave Coating on Microstructure, Hardness and Wear of AISI H13 Tool Steel. Artigo (International Journal of Current Engineering and Technology) - Delhi Technological University, Delhi, India, 2018.

ZHENHUA, C.; LIAO, H.; DENG, S.; MONTAVON, G., The Effect of Spray Distance and Scanning Step on the Coating Thickness Uniformity in Cold Spray Process. Artigo (Journal of Thermal Spray Technology) - Wuhan University of Technology. Wuhan, China, 2013.

