



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão.**

**CARLOS ALBERTO MARCHIOLI**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências dos Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Augusto Couto.

São Paulo

2021

**INSTITUTO DE PESQUISA ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada a Universidade de São Paulo**

**Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e  
nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380  
fundidas sob pressão.**

Versão Corrigida  
Versão Original disponível no IPEN

**CARLOS ALBERTO MARCHIOLI**

Dissertação apresentada como  
parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Mestre em Ciências  
dos Materiais.

**Orientador:**  
**Prof. Dr. Antônio Augusto Couto.**

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo ou pesquisa, desde que citada a fonte.

MARCHIOLI, Carlos. A.. ***Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão*** 2021.102 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Materiais) Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: da/mm/aaaa

MARCHIOLI, Carlos Alberto

Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão / Carlos Alberto Marchioli. Orientador Antonio Augusto Couto. São Paulo, 2021.

102 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo.

1. Fundição sob pressão.
2. Ligas de alumínio.
3. Fases de injeção
4. Velocidade de injeção

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: Carlos Alberto Marchioli

Título: Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão.

Dissertação apresentada ao de Pós-graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 06/12/2021

### **Banca Examinadora**

**Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier**

**Instituição: Faculdade de Tecnologia de São Paulo**

**Julgamento Aprovado**

**Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos**

**Instituição: Instituto Federal de São Paulo**

**Julgamento Aprovado**

**Prof. Dr. Antonio Augusto Couto**

**Instituição: Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares**

**Julgamento Aprovado**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por permitir, nesse momento da minha vida, a oportunidade de realizar esse trabalho, a minha família, especialmente a minha esposa e ao meu filho, pela paciência e incentivo, aos parentes e amigos pela força e ânimo para a finalização do presente trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Antônio Augusto Couto pela atenção, ânimo, dedicação e ensinamentos recebidos para a realização do presente estudo.

Agradecimentos também são externados a Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” pelas facilidades oferecidas na utilização dos laboratórios, aos colegas Welmo de Souza Silva, Joyce Herculano e Nayara Souza de Oliveira que auxiliaram na realização dos ensaios.

*“A vida não é tanto sobre o que você conquista, mas sobre o que você supera.”*

*Robin Roberts*

## RESUMO

MARCHIOLI, Carlos A. Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão. 2021. 102 p. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

As ligas utilizadas nesta pesquisa para fundição sob pressão são as de Al-Si, por apresentarem baixo ponto de fusão, dureza, alongamento e um limite de resistência alto, entre 200 a 300 MPa. O processo citado aplica uma alta velocidade de injeção do metal líquido, no molde, obtendo-se uma estrutura com grãos refinados e gerando diversos defeitos como microporosidade, junta fria e falha de enchimento, resultando em baixas propriedades mecânicas do produto. Esses defeitos surgem na deficiência no projeto do ferramental: molde de injeção, na definição dos cálculos e controle dos parâmetros de injeção. Esta dissertação tem como objetivo principal analisar a influência das velocidades da primeira e da segunda fase de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos corpos de prova normalizados na liga A380 para melhorar a qualidade dos produtos fundidos sob pressão. O desenvolvimento e a análise dos resultados das propriedades mecânicas da liga A380 basearam-se na obtenção de corpos de prova normatizados via máquina injetora de câmara fria. Os parâmetros de regulação consideraram 03 variações de velocidades diferentes na 1ª fase: 0,10m/s, 0,25m/s e 0,50m/s e da mesma forma, para a 2ª fase: 0,6m/s, 1,5m/s e 3,0m/s. A caracterização das propriedades mecânicas foi realizada por meio de ensaios mecânicos de tração e de dureza. A análise dos resultados, foi realizada através da caracterização microestrutural por microscopia óptica para as variações de velocidades de fases. Os resultados preliminares do trabalho permitiram concluir que a velocidade de injeção não influencia nos limites de resistência, tanto na 1ª quanto na 2ª fase. Além disto, o nível de porosidades e descontinuidades e, portanto, a sanidade do produto altera em função das variações de velocidade, interferindo nos resultados do alongamento e do limite de escoamento dos produtos fundidos sob pressão.

Palavras chaves: Fundição sob pressão, Velocidades de injeção, Fases de Injeção, liga de alumínio A380, Defeitos.

## ABSTRACT

MARCHIOLI, Carlos A. Influência das velocidades das fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão. 2021. 102 p. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

The alloys used in this research for die casting are Al-Si, as they have a low melting point, hardness, elongation and a high strength limit, between 200 and 300 MPa. The mentioned process applies a high speed of injection of the liquid metal, in the mold, obtaining a structure with refined grains and generating several defects such as microporosity, cold joint and filling failure, resulting in low mechanical properties of the product. These defects arise from the deficiency in the tooling design: injection mold, in the definition of the calculations and control of the injection parameters. The main objective of this dissertation is to analyze the influence of the speeds of the first and second injection stages on the microstructure and mechanical properties of specimens normalized in the A380 alloy to improve the quality of die-cast products. The development and analysis of the results of the mechanical properties of the A380 alloy were based on obtaining standardized specimens via a cold chamber injection molding machine. The adjustment parameters considered 03 different speed variations in the 1st phase: 0.10m/s, 0.25m/s and 0.50m/s and in the same way, for the 2nd phase: 0.6m/s, 1.5m/s 3.0m/s. The characterization of the mechanical properties was carried out through mechanical tensile and hardness tests. The analysis of the results was carried out through the microstructural characterization by optical microscopy for the variations of phase velocities. The preliminary results of the work allowed us to conclude that the injection speed does not influence the resistance limits, both in the 1st and 2nd phases. In addition, the level of porosities and discontinuities and therefore the sanity of the product change as a function of variations in speed, interfering with the results of elongation and yield strength of products cast under pressure.

Keywords: high pressure die casting. Velocity. Injection Phases. A380. Defects

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Célula automatizada de fundição sob pressão.....	06
Figura 02	Percentuais mínimo e máximo do grau de enchimento da câmara de injeção no processo de fundição sob pressão.....	07
Figura 03	Conjuntos de uma máquina injetora por câmara fria.....	08
Figura 04	Sistema de fechamento com os seus componentes.....	09
Figura 05	Sistema de fechamento da máquina injetora.....	09
Figura 06	Sistema de extração da máquina injetora e molde de injeção.....	10
Figura 07	Aplicação da pressão hidráulica originando a força de injeção da máquina injetora.....	11
Figura 08	Sete componentes do sistema de injeção da máquina injetora.....	12
Figura 09	Câmaras de injeção de máquinas injetora de câmara fria.....	13
Figura 10	Sistema da câmara de injeção da máquina injetora.....	14
Figura 11	Pressão específica na máquina injetora.....	15
Figura 12	Haste de injeção com o sistema de refrigeração.....	16
Figura 13	Acoplamento da haste unindo a haste de injeção com o cilindro de injeção da máquina injetora.....	16
Figura 14	Pistão de injeção em liga de CNCS (CuNiCrSi), CCNB (CuCoNiBe) da máquina injetora.....	17
Figura 15	Correlação dos parâmetros de velocidades e pressões das fases de injeção da máquina injetora.....	18
Figura 16	Avanço correto do pistão da primeira fase na câmara de injeção da máquina...	18
Figura 17	Efeito da variação da velocidade da primeira fase na injeção sobre o alumínio na formação de bolha de ar.....	19
Figura 18	Ponto do término da primeira fase de injeção desejado para a entrada do metal líquido na área do canal de corte na cavidade do molde.....	20
Figura 19	Início da velocidade da segunda fase de injeção no ponto do canal de corte....	21
Figura 20	Os três modelos de acumuladores de pressão que podem apresentar em máquinas injetoras.....	21
Figura 21	Início correto da segunda fase de injeção para que não haja o aprisionamento de ar e ocasionar defeito por bolha de ar.....	22
Figura 22	Cavidade do molde preenchida com a pressão específica sendo aplicada na área de moldagem pela terceira fase de injeção ou recalque.....	23
Figura 23	Terceira fase de injeção com a aplicação da pressão específica sendo aplicada na cavidade do molde preenchendo os vazios existente no momento da contração de solidificação da liga injetada.....	24
Figura 24	Contração e da solidificação da peça injetada com e sem atuação da terceira fase de injeção.....	24
Figura 25	Sistema de canais de injeção do molde de corpo de provas.....	27
Figura 26	Os formatos de sistemas de canais de injeção com o formato trapezoidal como a melhor opção para o fluxo do metal e a produção de peças.....	28
Figura 27	Formato trapezoidal do canal de corte com as medidas principais.....	29
Figura 28	Medida de 2/3 da espessura da parede da peça e a medida da altura do entalhe de 0,5 da espessura da peça no ponto de injeção.....	30
Figura 29	Formato e o dimensionamento da bolsa e de saída de gases.....	31
Figura 30	Circuito de refrigeração empregado na refrigeração de uma peça.....	32
Figura 31	Película de desmoldante aplicada sobre a cavidade e a aderência do metal líquido injetado.....	33
Figura 32	Efeito de Leidenfrost quando a camada de vapor repele o desmoldante da superfície do molde.....	34
Figura 33	Formação do grão do alumínio puro e ligas.....	38

Figura 34	Defeito de junta fria ocasionado pelo encontro do fluxo de metal líquido.....	47
Figura 35	Detalhe do defeito de Aderência ocasionado pela deficiência na lubrificação e o desgaste do molde/macho.....	49
Figura 36	Detalhe do defeito por Trinca no processo de fundição sob pressão.....	50
Figura 37	Chupagem na imagem A e o Rechupe na imagem B.....	51
Figura 38	Defeito de Bolha formada pelo aprisionamento de gases no momento da solidificação do metal líquido.....	52
Figura 39	Defeito de Bolha de gases retido na região do canal de corte e o do canal da bolsa de ar.....	53
Figura 40	Detalhe de um defeito de Enchimento incompleto no processo de fundição sob pressão.....	53
Figura 41	Inclusão de óxido decorrente da injeção no processo de fundição sob pressão	54
Figura 42	Comparativo dos limites de resistência e percentual de alongamento para cada tipo de processo de fundição existente.....	57
Figura 43	Influência da taxa de solidificação e dos SDAS sobre a resistência mecânica e a ductibilidade de uma liga fundida em alumínio.....	59
Figura 44	Formação da bolha de ar preso e a camada oxidada do metal líquido no processo de fundição sob pressão.....	60
Figura 45	Correlação entre o percentual de porosidade em relação aos parâmetros de velocidades e pressões.....	61
Figura 46	Correlação entre o nível de porosidade em relação a pressão máxima de intensificação aplicada (terceira fase de injeção).....	61
Figura 47	Fluxograma do processo de injeção para obtenção dos corpos de prova.....	62
Figura 48	Forno elétrico de fusão e de espera da liga A380 utilizado para a injeção dos corpos de provas.....	63
Figura 49	Equipamento de espectrometria de emissão óptica do Instituto SENAI de Tecnologia em Metalurgia da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.....	64
Figura 50	Pirômetro do forno de espera/manutenção da máquina injetora.....	65
Figura 51	Máquina injetora do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo utilizada na realização dos testes para a dissertação.....	65
Figura 52	Croqui do corpo de prova adaptado pela ABNT NBR 7549:2008 utilizado para injeção dos fundidos.....	70
Figura 53	Figura A é a parte fixa do molde utilizado no Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo e a figura B como o corpo de prova injetado.....	70
Figura 54	Formato trapezoidal do sistema de canal do processo de fundição sob pressão e suas regiões a serem dimensionadas.....	71
Figura 55	Foundry Degassing Unit (FDU) do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.....	73
Figura 56	Máquina de ensaios universal da do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo utilizada nos ensaios deste trabalho	77
Figura 57	Durômetros utilizados na realização da dissertação do laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.....	78
Figura 58	Durômetro digital e o detalhe do faceamento do corpo de prova para a realização do ensaio.....	78
Figura 59	Figura 59 Laboratório de Preparação de amostras utilizado da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.....	79
Figura 60	Laboratório de Microscopia Óptica da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo	80
Figura 61	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV – do Laboratório de Nanotecnologia da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.....	80
Figura 62	Micrografias de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 atacadas com o reativo Keller para a classificação do TG via Software “Stream Motion” e método planimétrico nas velocidades especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s da 1ª fase de injeção.....	84

Figura 63	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,1 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	86
Figura 64	Microestrutura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,1 m/s que apresentou os melhores resultados de propriedades mecânicas. Ataque com HF (0,5%) - Região da borda.....	86
Figura 65	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,1 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX.....	87
Figura 66	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	88
Figura 67	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,25 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX.....	88
Figura 68	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,5 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	89
Figura 69	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,50 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX.....	89
Figura 70	Micrografias de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 atacadas com o reativo Keller para a classificação do TG via Software "Stream Motion" e método planimétrico nas velocidades de 0,6 m/s, 1,5 m/s e 3,0 m/s da 2ª fase de injeção.....	94
Figura 71	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 0,6 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	96
Figura 72	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 0,6 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KK.....	96
Figura 73	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 1,5 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	97
Figura 74	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 1,5 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX.....	97
Figura 75	Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 3,0 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%.....	98
Figura 76	Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 3,0 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX.....	98
Figura 77	Amostra de 0,1 m/s atacada com HF (0,5%) - Aumento de 100x, com a escrita chinesa, poros, a alumínio em fase alfa e o Si em rede eutética.....	100
Figura 78	Aspecto da superfície de fratura do corpo de prova de tração no estado bruto de fundição.....	102

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01	Volume de ar x % grau de enchimento x diâmetro da câmara de injeção.....	13
Gráfico 02	Efetividade do resfriamento do molde em relação a temperatura de trabalho.....	33
Gráfico 03	Diagrama binário da solidificação das ligas Al-Si.....	40
Gráfico 04	Valores de LRT e de LE obtidos em ensaios de tração em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s.....	82
Gráfico 05	Valores de alongamento obtidos em ensaios de tração em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s.....	83
Gráfico 06	Valores de dureza Brinell em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s.....	84
Gráfico 07	Classificação do tamanho de grão (TG) de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 injetados nas velocidades especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s da 1ª fase de injeção.....	85
Gráfico 08	Valores de LRT e de LE em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s).....	92
Gráfico 09	Valores de alongamento em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s).....	93
Gráfico 10	Valores de dureza Brinell em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s).....	94
Gráfico 11	Classificação do TG obtido via Software “Stream Motion” e método planimétrico em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s).....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Pressão específica em kg/cm <sup>2</sup> .....	15
Tabela 02	Ligas do pistão de injeção CNCS (CuNiCrSi), CCNB (CuCoNiBe) da máquina injetora.....	17
Tabela 03	Variação da velocidade de injeção em cm/s em função da espessura média da parede da peça em mm.....	22
Tabela 04	Relação da espessura média da parede da peça em mm com o peso da pesa completa em grama para obtenção dos tempos de enchimento.....	29
Tabela 05	Relação da espessura média da parede da peça onde será posicionado o canal de corte com a velocidade obtida em m/s ou cm/s.....	29
Tabela 06	Forma de classificação das séries das ligas de alumínio utilizadas no mercado pelas indústrias. Na dissertação a liga utiliza A380 é classificada na série 3.000.....	36
Tabela 07	Demonstra a faixa de composição química das principais ligas comerciais de alumínio de acordo com a Aluminum Association, na dissertação será a liga A 380 da série 3.000.....	37
Tabela 08	Composições nominais e limites de composição das ligas de alumínio 380.0 e A380.0.....	37
Tabela 09	Categorias das descontinuidades com as medidas em polegadas de referência para fundições sob pressão de alumínio.....	55
Tabela 10	Referências radiografias das descontinuidades classificadas pôr categorias e por medida do defeito em polegada para fundição sob pressão conforme a Norma ASTM E 505.....	56
Tabela 11	Comparação da sanidade e das propriedades mecânicas dos produtos fundidos nos processos de fundição existentes.....	58
Tabela 12	Dados técnicos da máquina injetora Frech 360 Ton. para cálculo da capacidade da injeção do corpo de prova.....	66
Tabela 13	Medidas do corpo de prova adaptado pela ABNT NBR 7549:2008.....	70
Tabela 14	Dados para cálculo do projeto do sistema de canais para o molde do corpo de prova no processo de fundição sob pressão.....	71
Tabela 15	Parâmetros de regulagem do processo de desgaseificação do alumínio líquido para a injeção dos corpos de prova.....	74
Tabela 16	Substância/concentração e a quantidade utilizada do escorificante.....	74
Tabela 17	Variáveis de processo que impactam diretamente nas propriedades mecânicas do fundido, mas que não faz parte do estudo proposto.....	75
Tabela 18	Variações das velocidades da primeira, segunda de injeção e os parâmetros de velocidades.....	75
Tabela 19	Composição química da liga normalizada e o resultado da amostra do forno de espera.....	81
Tabela 20	Resultados do ensaio de tração e do limite de escoamento para as variações das velocidades de primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	82
Tabela 21	Resultado das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação da taxa de alongamento para as variações das velocidades de primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	83
Tabela 22	Resultados das 6 (seis) amostras do ensaio dureza Brinell HB para as variações das velocidades primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	83
Tabela 23	Resultados do ensaio de tração e do limite de escoamento para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	91

Tabela 24	Resultado das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação da taxa de alongamento para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	92
Tabela 25	Resultados das 6 (seis) amostras do ensaio dureza Brinell HB para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.....	93

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
FISQP	Ficha de Informação de Segurança dos Produtos Químicos
LE	Limite de Escoamento
LRT	Limite de Resistência à Tração
LTDA.	Limitada
NADCA	North American Die Casting Association
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SAE	Society of Automotive Engineers
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

°C	Graus Celsius
Al	Alumínio
Bar	Unidade de Pressão
Ca	Cálcio
Cm	Centímetro – unidade de comprimento
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado – unidade de área
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico – unidade de volume
Cu	Cobre
G	Gramas – unidade de massa
Kgf	Quilograma-força – unidade de força
m/s	Metros por segundo – unidade de velocidade
Mg	Magnésio
Mm	Milímetros – unidade de comprimento
Mpa	Mega Pascal – unidade de pressão
Ni	Níquel
R	Raio
Si	Silício
Sn	Estanho
A	Fase alfa
B	Fase beta
Π	Pi
Mn	Manganês
%	Porcentagem
Fe	Ferro
Ti	Titânio
Cr	Cromo
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
<b>3.1</b>	<b>HISTÓRICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>3.2</b>	<b>FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO.....</b>	<b>5</b>
3.2.1	Conjunto construtivos das máquinas injetoras de Fundição sob pressão.....	7
3.2.2	Conjunto de acionamento.....	8
3.2.3	Conjunto de fechamento.....	8
3.2.4	Sistema de extração da máquina injetora.....	10
3.2.5	Conjuntos e parâmetros de injeção.....	11
<b>3.3</b>	<b>FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE UMA MÁQUINA INJETORA.....</b>	<b>17</b>
3.3.1	Velocidade da primeira fase de injeção.....	18
3.3.2	Velocidade da segunda fase de injeção.....	20
3.3.3	Velocidade da terceira fase de injeção.....	23
<b>3.4</b>	<b>MOLDE DE INJEÇÃO PARA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO.....</b>	<b>25</b>
3.4.1	Sistema de canais de alimentação.....	26
3.4.2	Bolsas de gases.....	31
3.4.3	Controle de temperatura do molde.....	32
3.4.4	Lubrificação do molde de injeção.....	33
<b>3.5</b>	<b>ALUMÍNIO E SUA LIGAS.....</b>	<b>35</b>
3.5.1	Classificação e propriedades.....	35
3.5.2	Ligas de alumínio fundidas para fundição sob pressão.....	36
3.5.3	Solidificação das ligas de Alumínio.....	38
3.5.4	Influência dos elementos de liga nas ligas de Al.....	41
3.5.5	Impurezas nas ligas de Al.....	42
<b>3.6</b>	<b>DEFEITOS DE FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....</b>	<b>43</b>
3.6.1	Defeitos no processo de Fundição sob pressão e possíveis soluções.....	47
<b>3.7</b>	<b>NORMA ASTM E 505 – Standard reference radiographs for inspection of aluminium and magnesium Die casting.....</b>	<b>54</b>
<b>3.8</b>	<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PRODUTOS FUNDIDOS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO.....</b>	<b>57</b>

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>PROCESSO DE INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2</b>	<b>ENSAIOS DESTRUTIVOS - MECÂNICOS .....</b>	<b>76</b>
4.2.1	Ensaio de tração.....	76
4.2.2	Ensaio de Dureza.....	77
4.2.3	Metalografia.....	78
4.2.4	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	80
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>RESULTADOS COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2</b>	<b>RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DAS VELOCIDADES DA 1ª FASE DE INJEÇÃO.....</b>	<b>81</b>
5.2.1	Ensaio de tração e alongamento.....	81
5.2.2	Ensaio de Dureza.....	83
5.2.3	Classificação do tamanho de grão.....	84
5.2.4	Micrografia e Microscopia Eletrônica de Varredura MEV.....	85
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DAS VELOCIDADES DA 2ª FASE DE INJEÇÃO.....</b>	<b>91</b>
5.3.1	Ensaio de tração e alongamento.....	91
5.3.2	Ensaio de Dureza.....	93
5.3.3	Classificação do tamanho de grão.....	94
5.3.4	Micrografia e Microscopia Eletrônica de Varredura MEV.....	95
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por componentes de menor peso vem elevando a utilização de ligas de alumínio em componentes automotivos em aplicações, tais como: blocos de motor, tampas de motor, *carters*, carcaças de caixa de câmbio, carcaças de bombas, suportes de motor etc. Isto vem exigindo dos fornecedores de materiais fundidos sob pressão, peças isentas de defeitos de fundição e as propriedades mecânicas elevadas em seus produtos fundidos.

Para que se obtenha um produto de alto padrão que atenda aos requisitos desejados, o processo de fundição sob pressão é cercado por muitas variáveis que impactam diretamente na qualidade do produto. Como exemplo das variáveis, podem ser citados: projeto do molde de injeção, temperatura do metal e do molde, quantidade de desmoldante aplicado na matriz, cadência operacional e o empirismo nos cálculos das variações das velocidades das fases de injeção da máquina injetora. O não controle desses itens pode resultar em propriedades mecânicas inferiores dos produtos fundidos e vários tipos de defeitos de fundição. Embora o processo de fundição sob pressão possua várias vantagens, componentes fabricados neste processo apresentam sérias limitações devido sua porosidade. A porosidade pode ocorrer pela contração do metal durante a solidificação, ou ainda por gases, que podem estar dissolvidos no metal fundido ou serem inclusos durante o preenchimento do molde. (BREVICK, 2009)

As peças produzidas no processo de fundição sob pressão são atualmente vistas como componentes de engenharia inovadora, que possibilitam redução de custos em processos posteriores e redução de peso. Dentre os processos de fundição de alumínio, a fundição sob pressão é o processo mais utilizado globalmente, contabilizando cerca de 70% da produção de peças fundidas em alumínio (APELIAM e MAKHLOUF, 2006).

O limite de resistência e de escoamento e a ductilidade das ligas de fundição são influenciados pelo efeito do teor de liga em solução sólida e a formação de partículas de segunda fase durante a solidificação no refinamento de grãos (L. CIZEK, M. GREGER, L. PAWLICA, L. A. DOBRZANSKI and T. TANSKI, 2004). Recentes estudos (B. H. Hu, K. K. TONG, X. P. NIU and I. PINWILL, N. MAHALLAWY, M. A. TAHA, E. POKORA and F. KLEIN, 2000) indicaram que as propriedades mecânicas do

produto fundido estão relacionadas com as velocidades do metal fundido no canal e a temperatura da matriz (JOONHONG PARK AND CHUNGAIL KANG, 2013).

No processo de fundição sob pressão, a liga de alumínio no estado líquido é injetada a velocidades de 20 a 60 m/s na cavidade do molde por meio de um pistão hidráulico. Os moldes são feitos de aço refrigerados com água ou óleo e trabalham normalmente em temperaturas da ordem de 200°C. Como os moldes não recebem pinturas de proteção, seria inviável manter uma pintura, isso devido à alta velocidade do jato de metal durante a injeção. Por isso, as ligas de alumínio devem ser saturadas em ferro para evitar problemas de colamento das peças fundidas nos moldes (FUOCO, 2020).

## **2 OBJETIVO GERAL**

Com objetivo de melhorar a qualidade dos produtos fundidos sob pressão, o presente trabalho analisou a influência das velocidades das duas fases de injeção na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio A380.

### **2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO**

O objetivo deste trabalho é analisar a influência das velocidades das fases de injeção: primeira e segunda fase na microestrutura e nas propriedades mecânicas de peças da liga de alumínio SAE 380 fundidas sob pressão.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 HISTÓRICO DO PROCESO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

A primeira máquina para fundição sob pressão destinou à fabricação de balas de chumbo para canhão e teria sido inventada por Bruce em 1838. Em 1849 foi patenteada a primeira máquina e era operada manualmente. Em 1907 Van Wagner patenteou a primeira máquina operada por ar comprimido e nos Estados Unidos da América do Norte a primeira a ser produzida e vendida comercialmente foi a máquina Soss.

Em 1822 Dr. William Church construiu uma máquina que fabricava letras de máquinas de escrever com capacidade de produzir 12.000 a 20.000 letras/dia e em 1838, David Brea Jr construiu uma máquina automática que produzia 165 letras de estanho por minuto.

Sturges patenteou em 1849, uma injetora em que o metal abaixo da câmara é forçado a passar por um tubo inclinado até a cavidade do molde, mas em 1877 Dusenbery patenteou um sistema similar em que a câmara estava toda envolvida pelo metal e sua admissão se dava por um orifício. (BRESCIANI, 1978)

Há uma evolução significativa das máquinas de injeção sob pressão nos últimos 30 anos, principalmente com o desenvolvimento da indústria automobilística objetivando produtos de alta performance em seus automóveis através da diminuição de peso e resistência a abrasão. (BOA, 2000). O processo com a menos distância entre a matéria prima e o produto. (ANDRESSEN, 2005).

### **Características gerais da fundição sob pressão no Brasil**

O processo de fundição sob pressão teve seu grande apogeu nas décadas de 50 e 60 nos Japão e Estados Unidos, mas só ocorreram grandes investimentos em pesquisas na década de 80 e a partir de então essa técnica começou a ser implantada no Brasil. Atualmente, utiliza-se o processo de fundição por pressão em inúmeras aplicações no Brasil e no mundo e as principais são na indústria automobilística, equipamentos eletrônicos, brinquedos, eletrodomésticos e linha branca.

### **O processo de fundição sob pressão**

No processo de fundição sob pressão, o metal líquido é submetido a pressões e velocidades de injeção, preenchendo a cavidade interna de um molde metálico de forma rápida que permite a produção de peças com dimensionamento e formas complexas da cavidade do molde. Os dois principais processos de fundição sob pressão existentes são: a injeção por câmara quente e a injeção por câmara fria, objetos de estudo desta dissertação. (LOZANO, 2005)

## **Aplicabilidade do processo de fundição sob pressão**

A fundição sob pressão é considerada um processo caro se comparado com os processos convencionais de fundição, como por exemplo a fundição em areia, em função dos altos investimentos em equipamentos e ferramentais necessários, porém o processo permite alta produtividade em função dos baixos ciclos de injeção e boa repetibilidade garantindo produtos de excelente qualidade.

O processo de fundição sob pressão é aplicado quando o número de peças a serem produzidas for muito elevado, na ordem de 5.000 peças produzidas diariamente para justificar o investimento em máquinas e moldes de alto custo. Outro fator importante da aplicação do processo de fundição sob pressão é para as peças com parede espessura de até 1 mm de espessura, havendo casos em que certas paredes que chegam até menos de 1 mm. A precisão dimensional, a capacidade de reproduzir detalhes do produto e a exigência de acabamento superficial diminuem custos de processamento das peças fundidas, nas operações posteriores de pintura, polimento, cromação *etc.* Sem a necessidade de tratamento do metal líquido com refinador de grão e modificador de Si. (FONSECA, 2001)

Porém, o processo de fundição sob pressão apresenta problemas operacionais que podem comprometer a qualidade do produto fundido, como por exemplo, o metal líquido é impulsionado pelo pistão para dentro da cavidade do molde e, frequentemente atinge os pontos de respiro, imediatamente solidificando, obstruindo a passagem do ar, de forma que a alta pressão, nestas ocorrências, apenas comprime os gases aprisionados ocasionando defeitos de fundição. (CAMPBELL, 1991).

A alta integridade, uma demanda específica desejada ou o acabamento mais preciso dos produtos fundidos, evidenciam-se certas vantagens, quando comparados com outros processos de fundição mais baratos. (FUOCO, 2020)

Devido as exigências apontadas para os produtos fundidos fizeram com que o aprimoramento técnico do processo alcançasse um alto desenvolvimento em ligas e suas devidas aplicações para determinados tipos de produtos distintos e dentre as mais empregadas na fundição destacam-se as ligas de alumínio na confecção de peças variadas para a indústria automobilística, aeronáutica, eletrodomésticos, linha branca *etc.*, as ligas de magnésio em peças para a indústria aeronáutica, automobilística *etc.*; as ligas de cobre (latão) na confecção de peças

para diversos fins industriais e as ligas de zinco (zamac) para a indústria automobilística e eletrodomésticos *etc.*

### **3.2 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

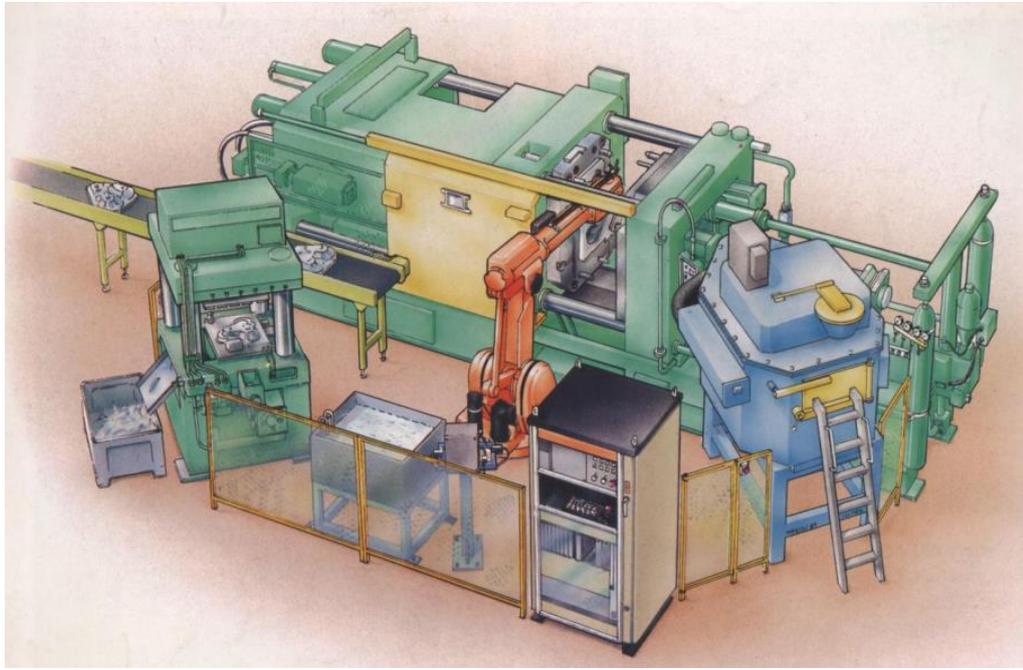
A produção de peças fundidas no processo de fundição sob pressão é realizada com equipamento caracterizado por máquinas de injeção de fundição à pressão construídos pelos grupos de injeção e o grupo de fechamento. As pressões e as velocidades de injeção que são conseguidas através de bombas hidráulicas e acumuladores de pressão incorporadas ao sistema construtivo das máquinas injetoras são itens fundamentais para a parametrização da repetibilidade do processo de fundição sob pressão. (MALAVAZI, 2008)

As máquinas de injeção para fundição sob pressão são conhecidas no mercado como máquina de injeção de câmara quente ou de máquina de injeção de câmara fria. Qualquer que seja o tipo, todas as máquinas para fundição sob pressão apresentam um conceito de prensa capaz de fechar as duas metades do molde, antes da injeção, e de abri-las, depois da solidificação do metal. Outra parte comum a todos os tipos de máquinas é o pistão de injeção que empurra o metal líquido a penetrar na cavidade do molde de injeção. Na maioria das máquinas, tanto a movimentação do molde, quanto a do pistão de injeção são obtidas por pressão hidráulica.

No sistema de câmara fria, a câmara de pressão e o forno de manutenção são unidades independentes. Uma das mais importantes vantagens do sistema de câmara fria, é que é possível utilizar para injeção de diversos materiais como por exemplo: ligas de alumínio, magnésio, cobre (latão) e ligas de zinco (zamac). A máquina injetora de câmara fria é independente do forno do metal a fundir, e seu princípio construtivo não se limita quanto às dimensões das peças. As máquinas injetoras de câmara quente em primeira linha são projetadas para fabricação de peças pequenas e têm disponibilidade de força de fechamento com no máximo 100 Ton., porém, as máquinas injetoras de câmara fria são projetadas com capacidades de força de fechamento de 5.000 Ton., com possibilidades de se construir máquinas maiores. A figura 01 exemplifica uma célula automatizada de fundição sob pressão com o forno dosador, sistema de lubrificação de molde de injeção, braço

automatizado para retirada da peça da injetora e prensa para rebarbação/corte de canal de injeção.

**Figura 01 Célula automatizada de fundição sob pressão**



**Fonte: Fundição sob pressão tecnologia do processo RSCPLABATS/DEMEC/**

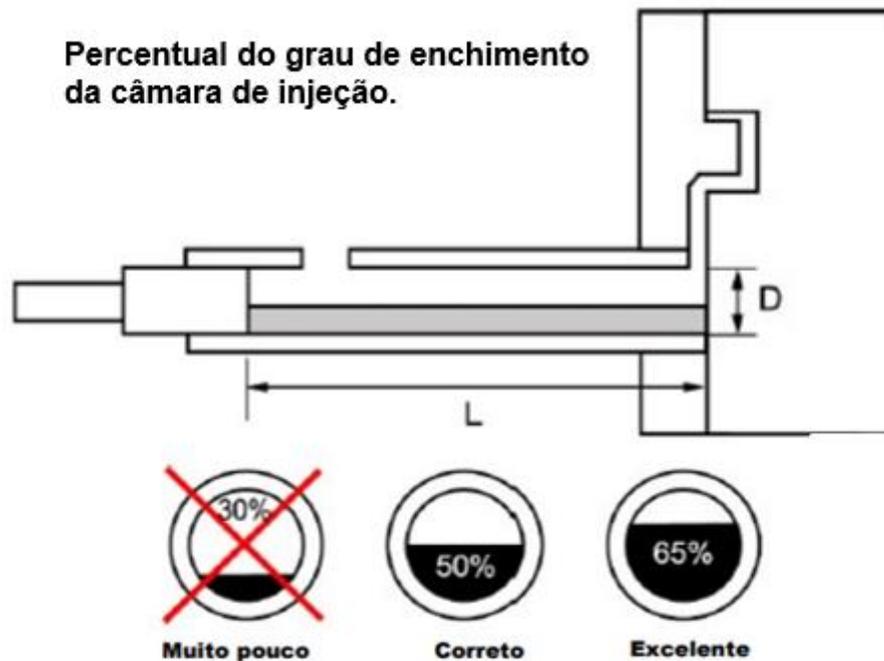
Na máquina injetora de câmara fria horizontal, que é a mais utilizada no mercado, a câmara de injeção nunca fica completamente cheia, e o ar nela encontrado é injetado com o metal líquido para a cavidade do molde durante a operação de injeção. Porém, deve-se prestar atenção nesta desvantagem, pois as velocidades e pressões de injeção do metal líquido é de modo gradual e controladas que permitem a eliminação do ar através das saídas de ar adequadas distribuídas no molde de injeção.

Com o pistão em sua posição de repouso, o metal líquido fundido é colocado na câmara de injeção com uma concha manualmente, com dispositivo de alimentação automatizado ou forno dosador. A câmara de injeção dispõe em sua parte superior de um orifício de carga convenientemente dimensionado para esse preenchimento.

A quantidade de metal necessário para injeção que cada peça, ocupa somente uma determinada parte do volume disponível na câmara de injeção, denominada de grau de enchimento conforme demonstrado na figura 02. A câmara de injeção tem o diâmetro interno de 40 a 120 mm e o volume de material a ser

moldado não deve ultrapassar a 80% do volume interno da câmara de injeção (FUOCO 2020).

**Figura 02** Percentuais mínimo e máximo do grau de enchimento da câmara de injeção no processo de fundição sob pressão



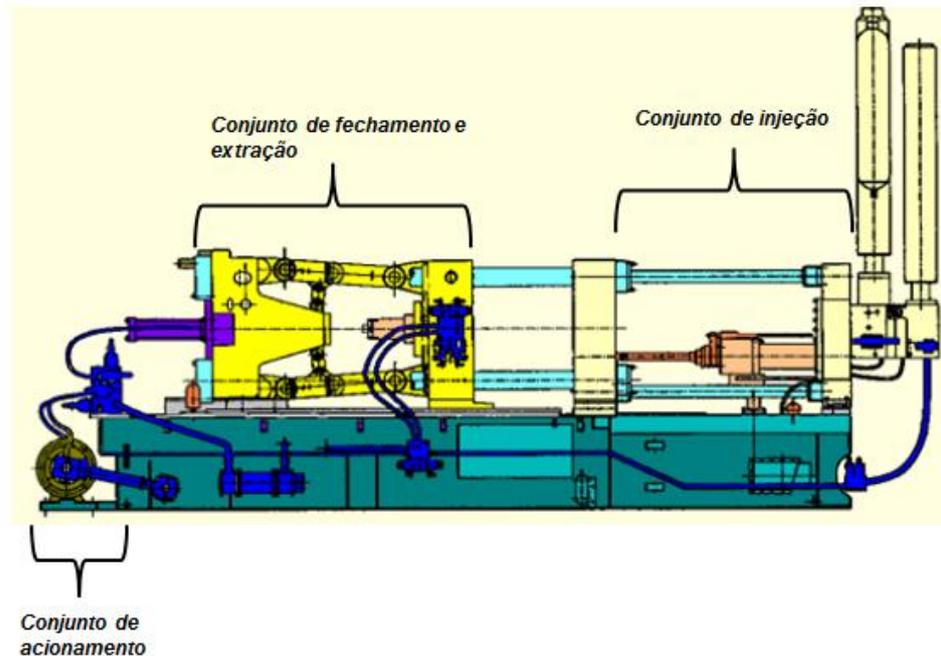
Fonte: Fuoco 2020

O pistão da máquina após injetar o material permanece com pressão até que o molde se abra e junto com a abertura do molde, o pistão avança aproximadamente de 40 a 50 mm, extraindo o tarugo central, retornando a sua posição inicial.

### 3.2.1 Conjuntos construtivos das máquinas de Fundição sob pressão

As máquinas injetoras de fundição sob pressão são constituídas por três conjuntos construtivos, o conjunto de acionamento, o conjunto de injeção e o conjunto de fechamento e extração. A figura 03 representa as partes principais de um sistema de uma máquina injetora por câmara fria com o conjunto de acionamento, conjunto de fechamento e extração e o conjunto de injeção

**Figura 03 Conjuntos de uma máquina injetora por câmara fria**



Fonte: Fundição sob pressão tecnologia do processo RSCPLABATS/DEMEC/

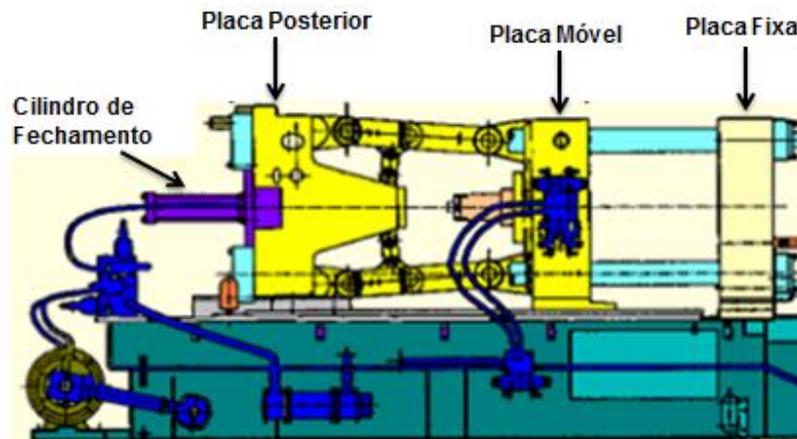
### **3.2.2 Conjunto de acionamento**

O conjunto de acionamento é a instalação hidráulica da máquina injetora que realiza a circulação do óleo hidráulico sob pressão para a movimentação de todos os outros conjuntos do equipamento. Através de válvulas com pressões ajustadas de serviço, o fluxo de óleo não utilizado retorna sem pressão para o tanque, através de válvulas de descarga, mantendo esta circulação sem pressão, até que em algum ponto específico do sistema necessite de fluxo hidráulico para acionamento de pistão, machos, extração da máquina e recarga do acumulador.

### **3.2.3 Conjunto de fechamento**

A função do conjunto de fechamento é a de abrir e fechar o molde mantendo-o travado na posição durante o processo de injeção e para que o metal fundido não escape pela linha de divisão do molde. A figura 04 representa o sistema de fechamento com os componentes placa fixa, placa móvel, placa posterior e o cilindro de fechamento que caracteriza o porte de máquina injetora.

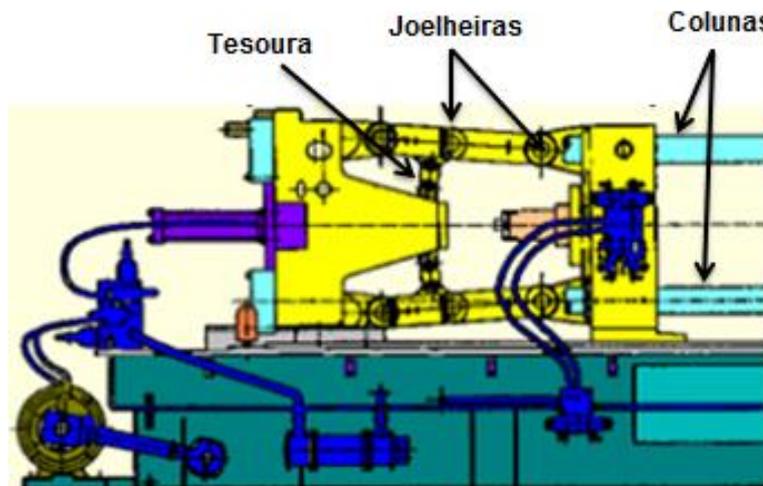
**Figura 04 Sistema de fechamento com os seus componentes**



Fonte: Fundição sob pressão tecnologia do processo RSCPLABATS/DEMEC/

O mecanismo de fechamento mais comum é conhecido como joelheiras que permite o travamento do molde quando totalmente estendidas e a sua força de fechamento aplicada, deixando a máquina totalmente travada, com a joelheira num ângulo superior a  $180^\circ$  para não ceder durante a injeção. A figura 05 representa o sistema de fechamento mais detalhado como o sistema de travamento com os elementos tesoura, joelheiras e colunas da máquina injetora.

**Figura 05 Sistema de fechamento da máquina injetora**



Fonte: Fundição sob pressão tecnologia do processo RSCPLABATS/DEMEC/

Com a pressão específica aplicada sobre o metal, definida por meio de cálculos ou da tabela 01, é preciso determinar a força do fechamento da máquina, que deverá ser superior à força exercida na face de abertura do molde em pelo

menos 20% para evitar a abertura do molde durante a injeção. Esse procedimento evita possíveis acidentes com o operador da máquina injetora.

O cálculo da força exercida na face de abertura do molde é realizado através da área da moldagem que inclui as peças, os canais de alimentação, as bolsas de ar e o tarugo central, devendo observar na peça as seguintes ocorrências: furos, rasgos etc. Será passante, considerando-se a peça sem estes detalhes, por conseguinte, multiplicando com a pressão específica utilizada sobre o metal fundido. Para tanto, utilizar-se-á a seguinte fórmula: (FRECH, 2006 e MALVAZI, 2008)

$$\text{Força de fechamento} = \text{Área de total moldagem} \times \text{Pressão específica [kgf]} \times 1,20$$

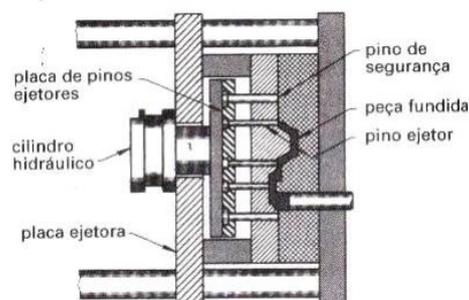
### 3.2.4 Sistema de extração da máquina injetora.

Com a pressão específica aplicada sobre o metal, definida por meio de cálculos ou da tabela 01, é preciso determinar a força do fechamento da máquina, que deverá ser superior à força exercida na face de abertura do molde em pelo menos 20% para evitar a abertura do molde durante a injeção. Esse procedimento evita possíveis acidentes com o operador da máquina injetora.

O cálculo da força exercida na face de abertura do molde é realizado através da área da moldagem que inclui as peças, os canais de alimentação, as bolsas de ar e o tarugo central, devendo observar na peça as seguintes ocorrências: furos, rasgos etc. Será passante, considerando-se a peça sem estes detalhes, por conseguinte, multiplicando com a pressão específica utilizada sobre o metal fundido. Para tanto, utilizar-se-á a seguinte fórmula: (FRECH, 2006 e MALVAZI, 2008)

$$\text{Força de fechamento} = \text{Área de total moldagem} \times \text{Pressão específica [kgf]} \times 1,20$$

Figura 06 Sistema de extração da máquina injetora e molde de injeção



Fonte: Norberto Moro, Processo de fabricação, 2007, p 18

### 3.2.5 Conjuntos e parâmetros de injeção

O principal objetivo do parâmetro é garantir a repetibilidade da injeção no processo de fundição sob pressão, a boa fluidez do metal fundido através de um enchimento suave na cavidade do molde, arrefecimento na configuração de forma a atender aos requisitos para a produção de produtos de qualidade.

No processo de fundição sob pressão por injeção de alumínio líquido, os parâmetros de processo mais importantes são a força de injeção da máquina, a pressão específica, a área de moldagem, a força de fechamento, a pressão de linha, a pressão do acumulador, as temperaturas do metal líquido e molde de injeção e as velocidades e comprimentos das fases de injeção para a garantia da qualidade do fundido no processo de fundição sob pressão.

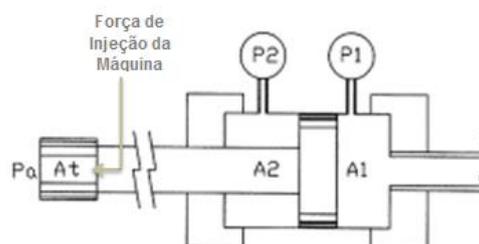
Para saber o valor da força de injeção da máquina é necessário buscar a informação no manual da máquina injetora ou saber o diâmetro do pistão hidráulico que normalmente está entre 6 e 10" para a maioria dos equipamentos e a pressão hidráulica da linha alimentadora, que está com a pressão variando entre 70 e 140 Kg/cm<sup>2</sup> dependendo do porte de cada máquina injetora.

Com o diâmetro definido, calcula-se a área do pistão de injeção da máquina e multiplicando-se pela pressão hidráulica conhece-se a força de injeção da máquina. Na figura 07 esquematiza a aplicação da pressão hidráulica sendo exercida sobre a área A1 originando a força de injeção da máquina injetora aplicada sobre a câmara de injeção, item importante para a determinação da pressão específica aplicada sobre o metal líquido. Para o cálculo da força de injeção da máquina é utilizada a seguinte fórmula (BRUNHUBER, 1972 e MALVAZI, 2008):

$$\text{Área do pistão} = \pi \times R^2 = [cm^2] \text{ ou } (\pi \times D^2) : (4) = [cm^2]$$

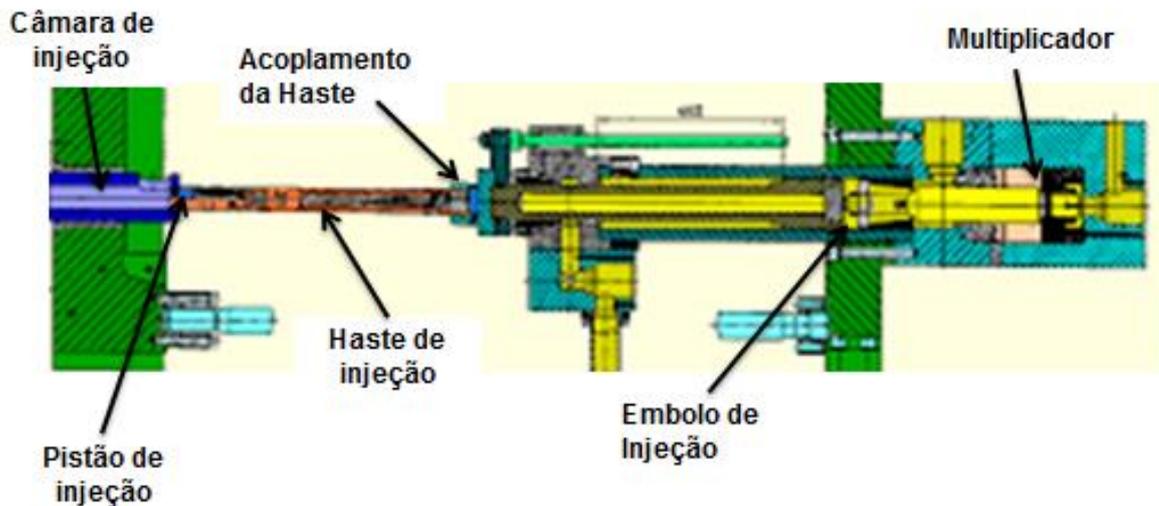
$$\text{Força de injeção d (F.I.M)} = \text{Área do pistão hidráulico} \times \text{Pressão de linha}$$

Figura 07 Aplicação da pressão hidráulica originando a força de injeção da máquina injetora



O sistema de injeção de uma máquina injetora de câmara fria é constituído por sete componentes, a câmara de injeção, o pistão de injeção, a haste de injeção, o acoplamento da haste, o embolo de injeção e multiplicador. A figura 08 demonstra os sete componentes do sistema de injeção da máquina injetora com o multiplicador da terceira fase de injeção.

**Figura 08 Sete componentes do sistema de injeção da máquina injetora.**



Fonte: [ftp.demec.ufpr.br](http://ftp.demec.ufpr.br)

A câmara de injeção da máquina injetora é o recipiente onde o metal líquido que será injetado é depositado, sendo fabricado em aço para trabalho à quente, classificado como H13, constituído de um canal para alimentação do metal líquido e um flange externa que está localizada entre a placa fixa da máquina e placa fixa do molde impedindo sua movimentação por movimentação da injeção. A câmara de injeção é submetida a tratamentos térmicos de tempera e nitretação no seu diâmetro interno para elevar dureza, a resistência ao desgaste e o agarramento do metal líquido após a injeção. A figura 09 mostra as câmaras de injeção não bipartida com dimensionamento de vários comprimentos e diâmetros de acordo com a capacidade da máquina e, conseqüentemente haverá pressões específicas diferentes.

**Figura 09 Câmaras de injeção de máquinas injetora de câmara fria**

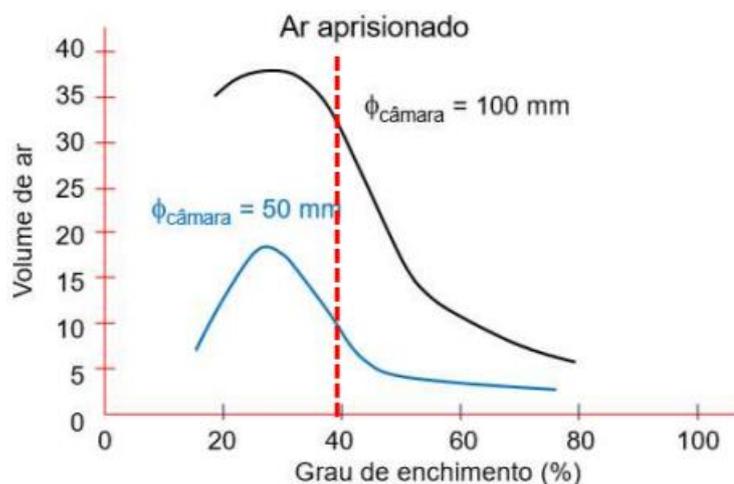


Fonte: Fuoco 2020

Ocorrem três fatores importantes na câmara de injeção da máquina injetora, a área útil onde se determina o grau de enchimento com o metal líquido, o comprimento útil mínimo para o cálculo do comprimento da primeira fase injeção e a pressão específica sobre o metal, que pode ser dimensionada através do diâmetro da câmara de injeção ou utilizando a tabela com as características das peças e o metal líquido a serem injetadas.

A quantidade de metal necessário para cada peça ocupa somente uma determinada parte do volume disponível na câmara de injeção, portanto, o grau de enchimento da câmara de injeção nunca será de 100%. Assim, ao soltar o disparo, o pistão de injeção em seu movimento de avanço encobre a entrada do metal líquido, retendo o ar da câmara, que deve escapar pelo sistema de saída de ar do molde. O gráfico 01 representa o volume ar retido em relação ao grau de enchimento em porcentagem com a mudança dos diâmetros câmara de injeção

**Gráfico 01 Volume de ar x % grau de enchimento x diâmetro da câmara de injeção**

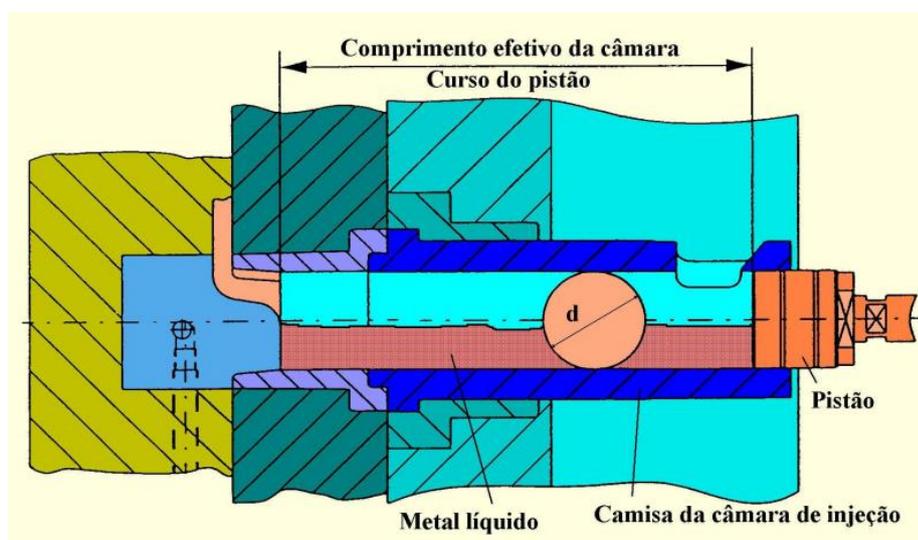


Fonte: Fuoco 2020

Para obter-se a área útil através do grau de enchimento desejado é necessário calcular o volume total de moldagem, volume de metal líquido em  $\text{cm}^3$  incluindo o volume das peças, canais de alimentação, canal central e bolsas de ar, utilizando a fórmula (BRUNHUBER, 1972 e MALAVAZI, 2008) e a figura 10 representa o sistema da câmara de injeção com o curso do pistão, o grau de enchimento e o pistão de injeção na sua posição de início de injeção.

$$\text{Área útil} = \pi \times R^2 \times GE = [\text{cm}^2] \text{ ou } (\pi \times D^2) : (4) \times GE = [\text{cm}^2]$$

Figura 10 Sistema da câmara de injeção da máquina injetora



Fonte: ftp.demec.ufpr.br

Para não formar nenhuma onda de choque na câmara de injeção, a velocidade do pistão em primeira fase de injeção deve avançar em princípio com baixa velocidade para que se tenha segurança de que o metal fundido não escorra através da entrada de carregamento. Desta forma, o metal líquido passa sendo comprimido contra a cavidade do molde.

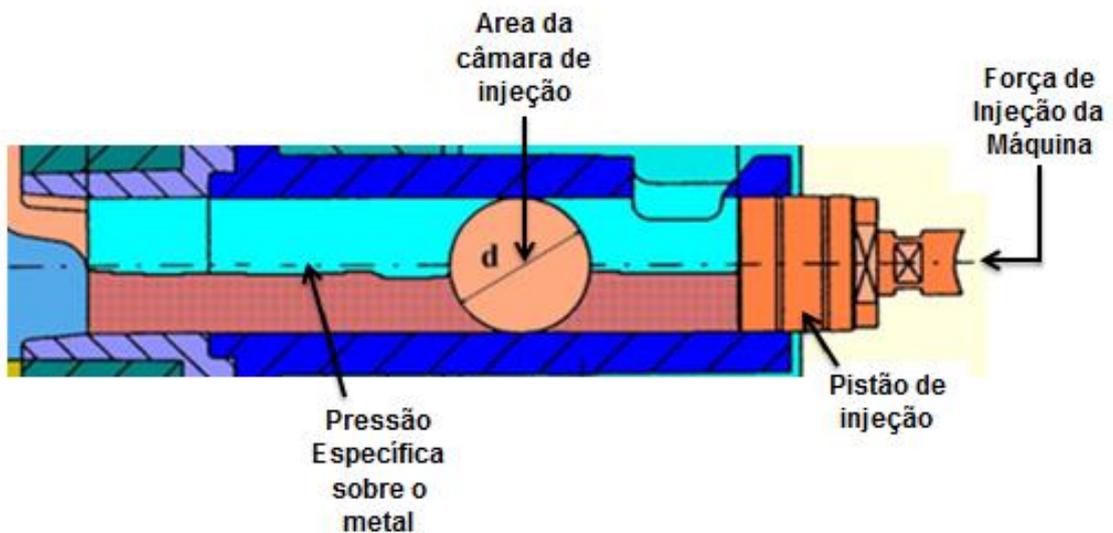
O comprimento útil da câmara de injeção da máquina é calculado através do volume total de moldagem, volume de metal líquido desejado na injeção, dividindo pela área útil desejada, grau de enchimento, como demonstrado a seguir: (BRUNHUBER, 1972 e MALAVAZI, 2008):

$$\text{Comprimento útil da câmara} = \frac{\text{Volume total da moldagem}}{\text{Área útil}} [\text{cm}]$$

A pressão específica sobre o metal é a pressão aplicada na câmara de injeção no momento da primeira fase de injeção e a figura 11 esquematiza a força de injeção da máquina sendo aplicada na área da câmara/pistão de injeção originando a pressão específica sobre o metal projetada. Sob esta pressão, a massa de metal líquido solidifica na cavidade do molde e o seu valor depende dos requisitos de qualidade da peça fundida sob pressão (FRECH, 2006). Existem duas maneiras de se projetar a pressão específica na câmara de injeção da máquina injetora. A primeira é calculando através do conhecimento da força de injeção da máquina, dividindo pela área da câmara de injeção, conforme fórmula demonstrada abaixo: (BRUNHUBER, 1972 e MALAVAZI, 2008):

$$P.E = \frac{\text{Força de injeção da máquina}}{\text{área do recipiente [cm}^2\text{]}} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Figura 11 Pressão específica na máquina injetora



Fonte: ftp.demec.ufpr.br

A segunda maneira de se projetar a pressão específica é utilizar a tabela 01 como referência para cada tipo de peça com relação a liga do metal líquido utilizado e a pressão específica em kg/cm<sup>2</sup> correlacionada.

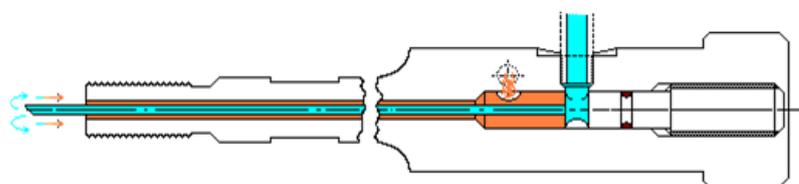
Tabela 01 Pressão específica em kg/cm<sup>2</sup>

Tipos de peças	Alumínio	Zinco	Magnésio	Cobre
Standart	300 – 400	100 – 200	200 – 400	300 – 400
Técnicas	400 – 800	200 – 300	400 – 600	400 – 500
Estanques	800 – 1200	250 – 400	800 – 1000	800 – 1000

Fonte: Oskar Frech GmbH

A haste de injeção da máquina injetora é parte mecânica que conecta o pistão de injeção com o grupo de injeção. A figura 12 esquematiza a haste de injeção com os seu sistema de refrigeração com o cano de cobre para o resfriamento da “cabeça do pistão” e a abertura para o retorno da água aquecida para ser resfriada em um sistema com circuito fechado de refrigeração. Esta haste é fabricada em aço carbono e constituída em uma extremidade com rosca para a fixação do pistão de injeção e na outra extremidade de um flange que permite a fixação ao sistema de acoplamento do cilindro de injeção da máquina injetora.

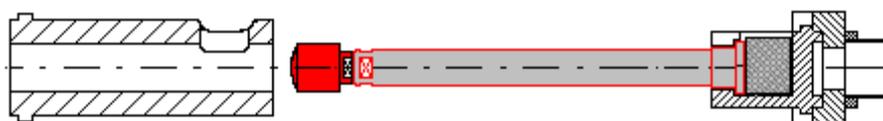
**Figura 12 Haste de injeção com o sistema de refrigeração**



Fonte: MALAVAZI, 2008

O acoplamento tem como objetivo realizar a junção da haste de injeção e a haste do cilindro de injeção da máquina injetora e é fabricada em aço carbono. A figura 13 mostra o local do acoplamento da haste unindo a haste de injeção com o cilindro de injeção da máquina injetora em um sistema de troca rápida. O acoplamento possui diversos modelos em função do projeto do fabricante da máquina injetora e para o melhor setup e troca do pistão o melhor é aquele com remoção rápida e ágil da haste.

**Figura 13 Acoplamento da haste unindo a haste de injeção com o cilindro de injeção da máquina injetora**



Fonte: MALAVAZI, 2008

O pistão de injeção é o item que junto com a haste de injeção está em contato direto com metal líquido e o conduz para a cavidade do molde. Fabricado em ligas de cobre-cromo, cobre-berílio, bronze-alumínio, em função determinante da alta condutibilidade térmica e com a dureza menor em comparação com a câmara de injeção conforme demonstrado na tabela 02.

**Tabela 02 Ligas do pistão de injeção CNCS (CuNiCrSi), CCNB (CuCoNiBe) da máquina injetora**

Elementos de liga	CNCS	CCNB
% Cu	~ 96	~ 97,4
% Co	<0,0015	0,9
% Ni	1,8 - 3,0	~1,10
% Be	<0,0001	~0,50
% Cr	0,2 – 0,5	0,0017
% Si	0,4 – 0,8	0,013
Dureza [HB]	~215	~260
Cond. Térmica [W/mK]	190 – 240	230 – 250

Fonte: Tenowelding

O pistão de injeção possui internamente uma câmara para refrigeração e para permitir a rápida troca de calor entre a cabeça do pistão em contato com o metal líquido e a água de refrigeração por condução térmica, garantindo a estabilidade dimensional evitando problemas de interferências entre as tolerâncias do pistão e câmara de injeção. A figura 14 mostra a câmara de refrigeração do pistão de injeção

**Figura 14 Pistão de injeção em liga de CNCS (CuNiCrSi), CCNB (CuCoNiBe) da máquina injetora**



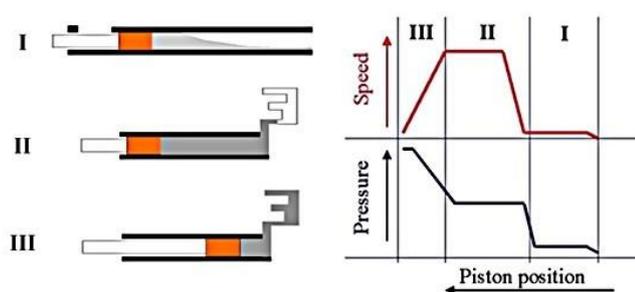
Fonte: Berymolde

### 3.3 FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE UMA MÁQUINA INJETORA

As máquinas de fundição sob pressão modernas o sistema de injeção está basicamente dividido em três fases de injeção. A primeira fase é o momento que ocorre o movimento lento do pistão de injeção (1 a 7 seg) e ao mesmo tempo a

expulsão do ar da câmara de injeção. A segunda fase a velocidade é mais rápida, a máquina injetora preenche a cavidade do molde em tempos relativos entre 50 e 100 milissegundos, e a terceira fase de injeção é a compactação do metal que ainda estiver líquido para evitar os defeitos de contração do metal (400 – 1200 Bar por 5 – 20 seg). (BONOLLO; GRAMEGNA; TIMELLI, 2015). A figura 15 esquematiza os parâmetros das fases de injeção da máquina injetora correlacionando as velocidades e as pressões aplicadas em cada fase da injeção.

**Figura 15 Correlação dos parâmetros de velocidades e pressões das fases de injeção da máquina injetora**

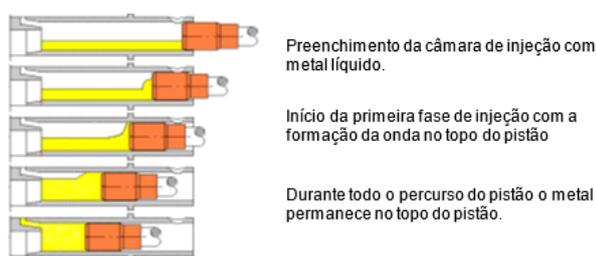


Fonte: Franco Bonollo

### 3.3.1 Velocidade da primeira fase de injeção

É a velocidade do pistão na primeira etapa de injeção controlada pela vazão da bomba hidráulica, que está entre 70 e 140 Kgf/cm<sup>2</sup> que determina a velocidade com que o pistão avança, sendo esta velocidade progressiva. A velocidade nesta fase é progressiva e controlada por intermédio de uma válvula controladora de fluxo. O pistão avança lentamente com o objetivo de não gerar turbulência no metal líquido e eliminar o ar de forma eficaz da câmara de injeção da máquina (BRESCIANI,1978). A figura 16 esquematiza o mecanismo correto de avanço do pistão da primeira fase na câmara de injeção da máquina evitando o aprisionamento do ar na câmara de injeção.

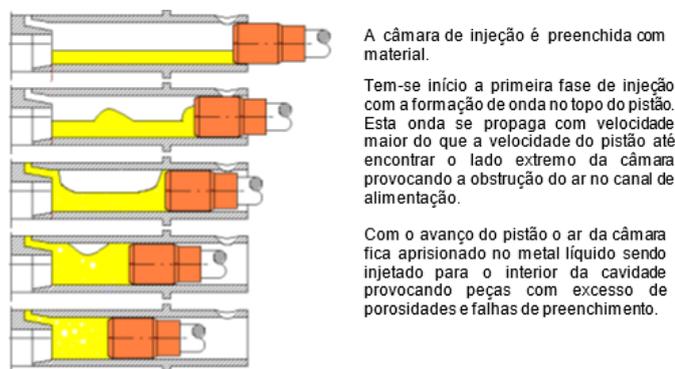
**Figura 16 Avanço correto do pistão da primeira fase na câmara de injeção da máquina**



Fonte: Guilherme O. Verran, Fundamento de Fundição sob pressão, p.25

A câmara de injeção é preenchida com metal líquido e começa no início da primeira fase de injeção com a formação de onda no topo do pistão. Esta onda se propaga com velocidade maior que a velocidade do pistão até encontrar o lado extremo da câmara de injeção, provocando a obstrução do ar no canal de alimentação, conseqüentemente é possível observar a onda formada conforme ilustra a figura 17.

**Figura 17 Efeito da variação da velocidade da primeira fase na injeção sobre o alumínio na formação de bolha de ar**



Fonte: Guilherme O. Verran, Fundamento de Fundição sob pressão, p.25

Com o avanço do pistão, o ar da câmara fica aprisionado no metal líquido sendo injetado para o interior da cavidade do molde, provocando peças com excesso de porosidades por bolhas de ar preso.

O processo de fundição sob pressão segundo (APELIAN, 2006), (BIRCH, 2000). e (NIU, 2000), apresenta desvantagem a produção de peças com poros e inclusões de óxidos e as causas para estes defeitos é atribuída ao ar e gases que podem estar dissolvidos no metal durante o movimento do pistão de injeção e a elevada turbulência no enchimento, que pulveriza o metal na cavidade do molde. A formação de porosidade em fundição sob pressão segundo (BIRCH, 2000), está favorecida quando há pouca pressão específica sobre o metal na injeção, pela taxa de ocupação da câmara de injeção menor que 40%, quando há excesso de desmoldante, a espessura do canal de ataque está menor do que 0,4 mm, a espessura do “biscoito” é menor do que 25 mm e a velocidade do pistão de injeção na primeira fase é muito alta.

Além da velocidade de injeção, para se evitar a formação da onda na cabeça do pistão de injeção e o aprisionamento de ar no metal líquido na primeira fase de injeção, é importante a definição do percurso percorrido pelo metal dentro da

câmara de injeção, definindo o comprimento aplicando a fórmula abaixo (MALVAZI, 2008) nesta etapa do processo de injeção. A figura 18 mostra o local do término da primeira fase de injeção coincidindo com a entrada do metal líquido na área do canal de corte na cavidade do molde. A figura A representa o ponto ideal do término da primeira fase de injeção, já a figura B demonstra a primeira fase de injeção com o término dentro da cavidade do molde, podendo acarretar defeitos de fundição como falha de enchimento ou junta fria.

$$C1 = A - B - \frac{(476,8 \times P)}{D^2} \text{ [mm]}$$

Onde:

C1 = Curso da 1ª fase (em milímetros).

A = Dimensão da câmara (em milímetros).

B = Comprimento do bloco difusor (em milímetros).

P = Peso da peça + bolsa de ar + tarugo (em gramas).

D = Diâmetro do pistão (em milímetros).

**Obs:** Quando o molde não possuir bloco difusor a dimensão B será 0 (zero).

**Figura 18 Ponto do término da primeira fase de injeção desejado para a entrada do metal líquido na área do canal de corte na cavidade do molde**

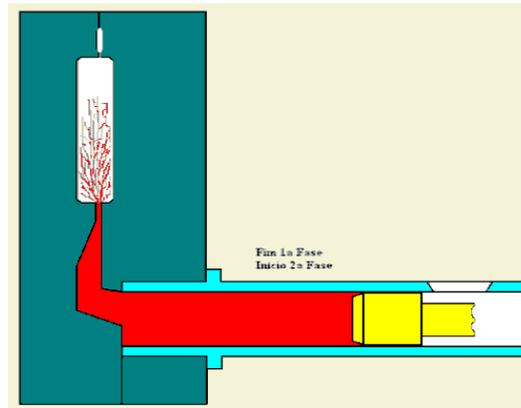


Fonte: Fuoco 2020

### 3.3.2 Velocidade da segunda fase de injeção

É o que podemos dizer que a injeção propriamente dita e responsável pelo enchimento da cavidade do molde com o metal líquido. A velocidade do pistão atinge valores de 0,1 a 5 m/s, resultando em velocidades do metal nos canais de corte (“ataque”) de 20 a 60 m/s. A figura 19 mostra o enchimento da cavidade do molde com o início da velocidade da segunda fase de injeção no ponto do canal de corte.

**Figura 19 Início da velocidade da segunda fase de injeção no ponto do canal de corte**

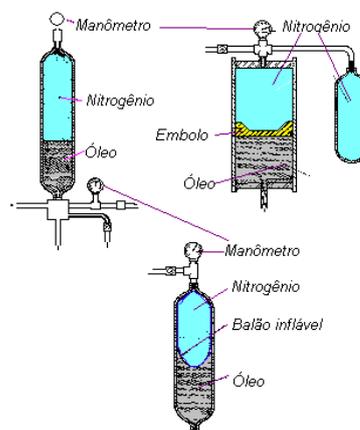


Fonte: W. Fischer

Nesta fase de injeção, a velocidade aumenta, pois, além de óleo enviado pela bomba hidráulica, quando acionado o fim do curso, final da primeira fase, é acionado a válvula de disparo do acumulador de pressão e o óleo nele contido com pressão de 80% (FRECH, 2006) da pressão da bomba hidráulica é liberado juntando-se ao óleo da bomba, aumentando a velocidade de injeção, velocidade constante. Este aumento depende da pressão, do volume a ser injetado e da seção de ataque, garantindo o preenchimento da peça (BRESCIANI, 1978).

O acumulador de pressão é um reservatório com gás Nitrogênio que quando comprimido pelo sistema hidráulico, bomba de alta pressão, fornecerá a energia necessária para que ocorra o disparo do pistão de injeção na segunda fase de injeção. A figura 20 apresenta os três modelos de acumuladores de pressão utilizados, com embolo, com bexiga de óleo hidráulico e o acumulador sem nenhuma forma de separação do óleo e o gás nitrogênio.

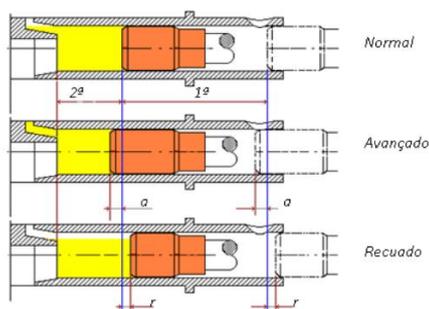
**Figura 20 Os três modelos de acumuladores de pressão que podem apresentar em máquinas injetoras**



Fonte: ftp.demec.ufpr.br

O ponto de início da segunda fase de injeção é quando teoricamente o metal líquido estiver próximo ao canal de corte “ataque”, então terá a atuação do acumulador de pressão e o início da segunda fase de injeção com a maior velocidade de injeção. A figura 21 especifica o ponto de início correto da segunda fase de injeção, caso o início avance ou recue poderá haver o aprisionamento de ar e ocasionar defeito por bolha de ar.

**Figura 21 Início correto da segunda fase de injeção para que não haja o aprisionamento de ar e ocasionar defeito por bolha de ar**



Fonte: Guilherme O. Verran, Fundamento de Fundição sob pressão, p.25

A velocidade da segunda fase de injeção é o avanço rápido do pistão para permitir o rápido preenchimento da cavidade do molde e sua regulação do parâmetro de injeção está relacionado em função do tempo de enchimento do molde, que, por sua vez, também está relacionado com a espessura da peça.

Segundo (FUOCO, 2020) esta velocidade de preenchimento deve ser menor ou igual ao tempo de resfriamento da peça, que depende principalmente da sua relação de espessura de parede da peça, isto é, quanto menor for à espessura das paredes da peça, maior deve ser a velocidade de injeção e quanto maior for a espessura das paredes, menor deve ser a velocidade de injeção.

Também é possível utilizar velocidades tabeladas pelos fornecedores de máquinas injetoras, que variam em função da espessura média da parede da peça como demonstrado na tabela 03 da empresa FRECH.

**Tabela 03 Variação da velocidade de injeção em cm/s em função da espessura média da parede da peça em mm**

Espessura média da parede da peça em mm	1,27	1,53	1,90	2,29	2,54	2,79	3,17	4,57	5,08
Velocidade do alumínio em cm/s	4680	4572	4420	4320	4267	4170	3962	3820	3658

Fonte: Oskar Frech GmbH

Também como parâmetro para o processo de fundição sob pressão, o comprimento da segunda fase de injeção é utilizado como referência para o ponto de início de injeção da segunda fase, utilizando o cálculo para a determinação do comprimento conforme a seguinte expressão (MALAVAZI, 2008):

$$\text{Curso Segunda fase} = CI - C1$$

$$CI = A - ET \text{ ou } CI = A - (ET + B)$$

Onde:

ET: Espessura do tarugo pode variar de 20 a 30 mm

C1: Curso da primeira fase varia de molde para molde

CI: Curso de injeção depende do curso da primeira fase, do comprimento do tarugo e comprimento da câmara.

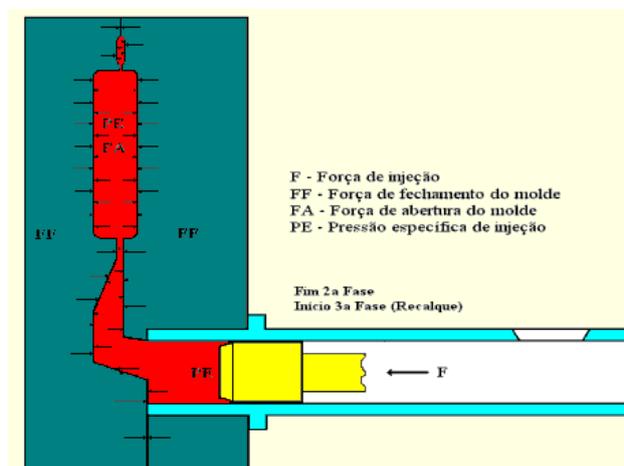
A = Dimensão da câmara.

B = Comprimento do bloco difusor.

### 3.3.3 Velocidade da terceira fase de injeção

A terceira fase de injeção é o tempo de consolidação necessário para que a pressão específica sobre o metal alcance seu máximo após a cavidade estiver completamente preenchida e compensar a contração de solidificação. A subida da pressão específica com o impacto, após o enchimento, é essencial para a consolidação do metal, sendo de grande importância para a melhoria da qualidade do fundido conforme representado na figura 22.

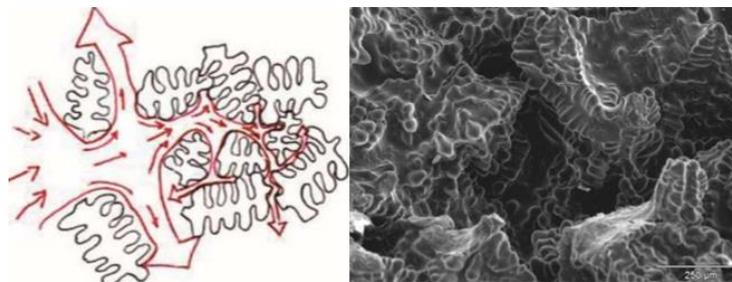
**Figura 22** Cavidade do molde preenchida com a pressão específica sendo aplicada na área de moldagem pela terceira fase de injeção ou recalque



Fonte: W. Fischer

A figura 23 demonstra que a terceira fase de injeção/compactação diminui os microrechupes que possam ocorrer nas peças, principalmente naquelas que exigem alta estanqueidade, ocorrendo a alimentação das contrações de solidificação e o “fechamento” das bolhas de ar preso, ocorrendo somente se os canais permanecerem líquidos por mais tempo do que a peça – solidificação direcional (BRESCIANI, 1978).

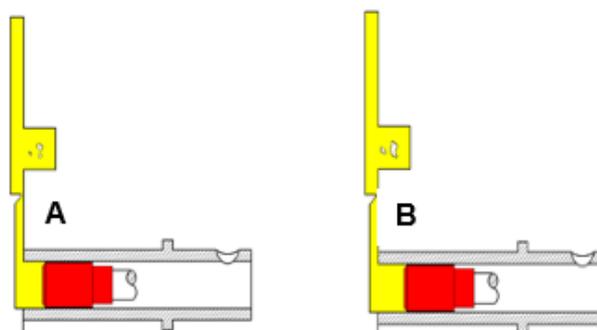
**Figura 23 Terceira fase de injeção com a aplicação da pressão específica sendo aplicada na cavidade do molde preenchendo os vazios existente no momento da contração de solidificação da liga injetada**



Fonte: Fuoco 2020

A figura 24 demonstra a contração da solidificação da peça injetada com e sem atuação da terceira fase de injeção. A figura A mostra a atuação da terceira fase, apresentando o tamanho de microrechupe menor em relação à figura B, onde não há a atuação da terceira fase, ocasionando um tamanho maior do defeito.

**Figura 24 Contração e da solidificação da peça injetada com e sem atuação da terceira fase de injeção**



Fonte: Guilherme O. Verran, Fundamento de Fundição sob pressão

O multiplicador, usado para tal propósito, tem a finalidade de gerar maior pressão de trabalho, porém, seu uso, às vezes, se faz desnecessário, mesmo porque alguns produtos requerem pressões de trabalho inferiores à pressão máxima da bomba.

A terceira fase de injeção só é solicitada quando a pressão para o trabalho desejado estiver acima de 150 Kgf/cm<sup>2</sup> pressão máxima da bomba. A regulagem se dá através da válvula e a pressão conferida no manômetro de pressão de trabalho. Para calcular a pressão de trabalho, usa-se a seguinte fórmula (FRECH, 2006 e MALAVAZI, 2008):

$$PT = \frac{PE \times d^2}{D^2} \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$$

PT = Pressão de trabalho

PE = Pressão específica

d<sup>2</sup> = Diâmetro do pistão de injeção

D<sup>2</sup> = Diâmetro do pistão hidráulico

### **3.4 MOLDE DE INJEÇÃO PARA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

No projeto de uma peça a ser fundida sob pressão, já se analisa a capacidade de essa peça suportar esforços sem se deformar ou se romper, de suportar as variações de temperatura, de permitir o fluxo adequado de metal líquido e gases, enfim, de cumprir sua futura função com eficiência. Toda essa análise é feita sem ter que se construir uma peça real. A fabricação só será aprovada quando estas análises concluírem que a peça funcionará adequadamente (COSTA, 2000).

Nesta fase de projeto, outros aspectos, como por exemplo, a geometria da peça deve ser considerada a fim de facilitar sua extração do molde. Outro ponto a ser analisado é a localização adequada dos canais de vazamento e distribuição do metal de modo que se propicie um enchimento correto do molde. As contrações e sobremetal também são consideradas na fabricação do modelo, para que a peça, ao contrair durante o resfriamento, chegue as suas dimensões corretas (COSTA, 2000).

Um molde de injeção pode ter uma ou mais cavidades. Cada cavidade representa uma peça por ciclo, quanto mais cavidades, maior será a produtividade, todavia existem limitações tais como o tamanho do molde e a capacidade de injeção da máquina injetora. Geralmente, dividida em duas partes, a cavidade do molde confere forma e acabamento ao material, sendo essencial que sua

rugosidade superficial seja igual à desejada para a peça, pois esta é transferida diretamente para o produto.

Normalmente, a etapa de retificação na usinagem do molde é suficiente, porém, dependendo da rugosidade desejada, processos adicionais podem ser necessários, tais como o polimento. Esta etapa de acabamento das cavidades é em alguns casos a parte mais custosa da produção do molde. Por causa da contração do metal, as cavidades necessitam ser ligeiramente maiores do que as dimensões da peça desejada. Além disso, para que a peça não se prenda ao molde de injeção ao se contrair, é necessário tomar conhecimento da taxa de contração mínima e máxima que cada metal apresenta, evitando sempre os ângulos retos, cantos vivos, que concentram tensões, que além de dificultarem a saída da peça, podem causar ferimentos.

As cavidades de um molde necessitam ser balanceadas para que haja uma distribuição uniforme do metal no molde a ser preenchido. Um balanceamento ineficiente poderá resultar em rebarbas, desgastes desiguais das colunas da máquina, produtos com propriedades irregulares, pois ocorrem variação de temperatura, pressão e velocidade de preenchimento em cada parte e principalmente o não preenchimento das cavidades (WIKIPEDIA)

Normalmente, nas matrizes do molde que entra em contato direto com o metal líquido, são fabricadas com um dos mais avançados materiais: é o Aço H13, de qualidade Premium Critérios de aceitação para matrizes de fundição sob pressão No. 207-2011 "publicado pela" *North American Associação de fundição sob pressão* (NADCA, 2012) que suportam elevadas temperaturas de trabalho bem com choques térmicos.

#### **3.4.1 Sistema de canais de alimentação**

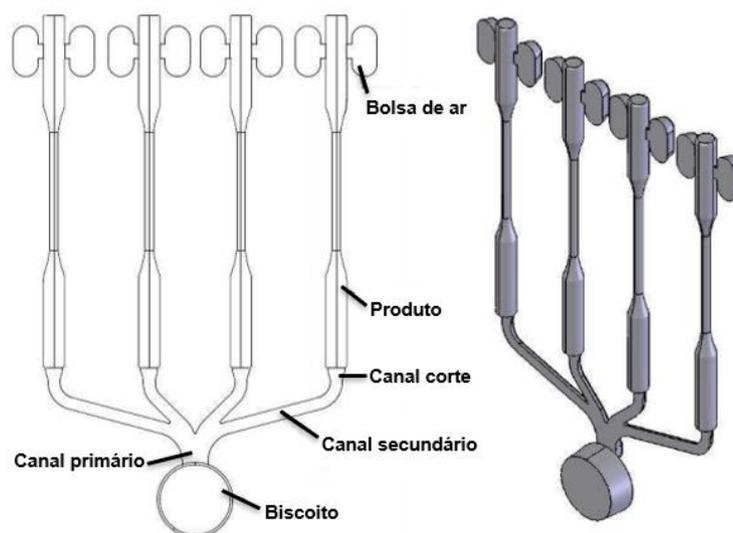
A qualidade do produto fundido dependerá também do sistema de canal projeto e para obter as condições ideais na fundição sob pressão, deve haver um equilíbrio entre o sistema de refrigeração e o sistema de alimentação, significando que o design do canais, entradas e posicionamento na peça é de fundamental importância. A posição das entradas e a espessura e largura das paredes divisórias entre eles são fatores decisivos para a velocidade de injeção do metal. As inscrições devem ser projetadas de modo que o metal injetado flua suavemente e

livremente em todas as áreas da cavidade. Se o metal de injeção for pulverizado em vez disso fluido entrando na cavidade, cria-se uma peça fundida defeituosa. Turbulência excessiva no material fundido pode causar problemas de erosão no molde (UDDEHOLM).

Para se obter um bom sistema de canal é necessário algumas regras como utilizar a mínima distância entre o centro da câmara de injeção e a região de entrada do canal de corte, evitar choque do metal líquido sobre pinos e machos e escolher parte volumosa da peça para a entrada do canal de corte.

Os sistemas de canais de alimentação devem ser dimensionados de forma a proporcionar uma melhor fluidez, velocidade e uma pressão adequada sobre o metal injetado. Para o dimensionamento dos canais é necessário seguir a ordem de primeiro dimensionar o canal de corte, que está em contato com a peça fundida, em seguida, o canal secundário que dará a origem da quantidade necessária de canal de corte, e por último, o canal primário, que está ligado ao biscoito no processo de injeção. A figura 25 esquematiza o sistema de canais de injeção do molde de corpo de provas com o canal de corte junto com o produto, na sequência o canal secundário e no final o canal primário com a bolacha.

**Figura 25 Sistema de canais de injeção do molde de corpo de provas**

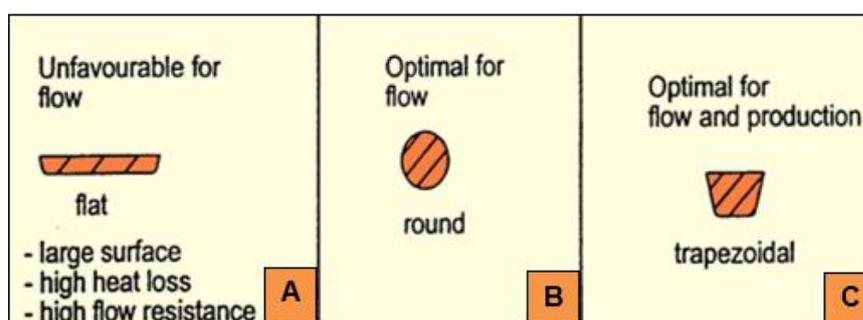


Fonte: Ibere Duarte, 2007

O formato dos canais deverá ser de forma trapezoidal, pois, segundo a prática, é o que dá melhor resultado e o seu comprimento deve ser conforme distribuição das cavidades e deverá ser o menor possível na sua altura para reduzir

a perda de temperatura, velocidade e pressão na cavidade. A figura 26 mostra os formatos de sistemas de canais de injeção com a figura A de formato plano não favorável para o fluxo metal na cavidade do molde, a figura B é o formato redondo como ótima opção para o fluxo do metal e a figura C representa o formato trapezoidal como a melhor opção para o fluxo do metal e a produção de peças.

**Figura 26 Os formatos de sistemas de canais de injeção com o formato trapezoidal como a melhor opção para o fluxo do metal e a produção de peças**



Fonte: O Autor 2021

A primeira etapa para o dimensionamento dos canais de injeção é a determinação da área do canal de corte, que está em contato diretamente na parede da peça, local onde o metal líquido preencherá a cavidade do molde. Para o cálculo da área do canal de corte, é necessário o volume total do produto, a velocidade de enchimento da cavidade, considerando a espessura média da parede da peça onde o canal de corte será posicionado. Utiliza-se para tanto a tabela 04 como referência para relação espessura média de parede e a velocidade desejada. Também é necessário o valor do tempo de enchimento da cavidade do molde obtido por meio de equação ou da tabela 05 da espessura média da parede da peça onde será posicionado o canal de corte em relação ao peso da peça completa a ser injetado em gramas.

A área do canal de corte for determinada por meio das seguintes equações e tabelas de referências para os cálculos (BRUNHUBER, 1972 e MALVAZI, 2008):

$$A.C.C = \frac{\text{Volume da peça}}{\text{Tempo de enchimento} \times \text{Velocidade de enchimento}} \text{ [m}^2 \text{ ou cm}^2\text{]}$$

$$TE = 0,04 \times (W - 1) \pm 0,02 \text{ [s]}$$

T.E = Tempo de enchimento

W = Espessura média de parede de peça

**Tabela 04** Relação da espessura média da parede da peça em mm com o peso da peça completa em grama para obtenção dos tempos de enchimento

Espessura média da parede em mm	Peso da peça completa em gramas		
	Até 150	150 a 1000	Acima 1000
1	0,010	0,020	0,030
1,5	0,010	0,020	0,030
1,8	0,020	0,040	0,060
2,0	0,020	0,040	0,060
2,3	0,030	0,050	0,070
2,5	0,040	0,065	0,080
3,0	0,050	0,075	0,090

Fonte: Oskar Frech GmbH

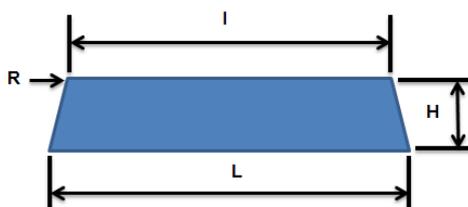
**Tabela 05** Relação da espessura média da parede da peça onde será posicionado o canal de corte com a velocidade obtida em m/s ou cm/s

Espessura média de parede da peça em mm	m/s	cm/s
1,27	46,80	4680
1,53	45,72	4572
1,90	44,20	4420
2,29	43,20	4320
2,54	42,67	4267
2,79	41,70	4170
3,17	41,20	4120
3,81	39,62	3962
4,57	38,20	3820
5,08	36,58	3658

Fonte: Oskar Frech GmbH

Com a área do canal de corte determinada, o segundo passo é o dimensionamento do canal determinando a altura (H), a largura inferior (L), a largura superior (I) e os raios de arredondamento de cantos (R) conforme demonstrado na figura 27 com as suas respectivas equações (BRUNHUBER, 1972 e MALVAZI, 2008):

**Figura 27** Formato trapezoidal do canal de corte com as medidas principais

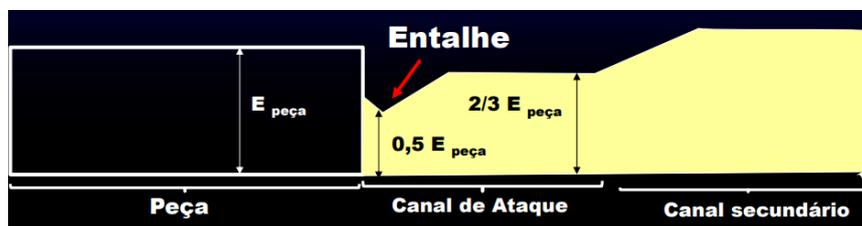


Fonte: O Autor. 2020

A figura 28 mostra a medida de 2/3 da espessura da parede da peça no ponto de injeção para a determinação da altura do canal de corte. Também demonstra a medida da altura do entalhe de 0,5 da espessura da peça no ponto de injeção, com o objetivo de evitar a solidificação prematura do canal para a atuação da terceira fase de injeção calculado pelas seguintes expressões:

$$H = \frac{2}{3} \text{ da espessura [mm]} \rightarrow \text{Entalhe} = 0,5 \text{ da espessura [mm]}$$

Figura 28 Medida de 2/3 da espessura da parede da peça e a medida da altura do entalhe de 0,5 da espessura da peça no ponto de injeção



Fonte: Fuoco 2020

Para a determinação da largura superior (l) é realizada a divisão da área do canal de corte (ACC) pela altura (H), conforme a equação abaixo:

$$l = \frac{\text{área do canal de corte}}{H}$$

A largura superior (L) é determinada pela tangente de  $10^\circ$ , multiplicada pela altura do canal (H), também multiplicado por dois, logo após, somando pela largura inferior (l) como demonstra a fórmula:

$$L = \text{tang. } 10^\circ \times H \times 2 + l$$

Os arredondamentos de cantos vivos também devem ser utilizados no processo de fundição sob pressão para evitar concentrações de tensões e reduzir a tendência à formação de pontos quentes. A fórmula utilizada para a determinação do raio de arredondamento de canto é a divisão da altura (H) por cinco com demonstrado abaixo:

$$R = \frac{H}{5}$$

### Dimensionamento do canal Secundário

$$l = 1,5 \times \sqrt{\frac{\text{n}^\circ \text{ de entrada} \times \text{área do canal de corte}}{1,1619}}$$

$$H = l = 1,35 \times l \quad R = \frac{H}{5} \quad ACS = \frac{(L+I)}{2} \times H$$

### Canal Primário

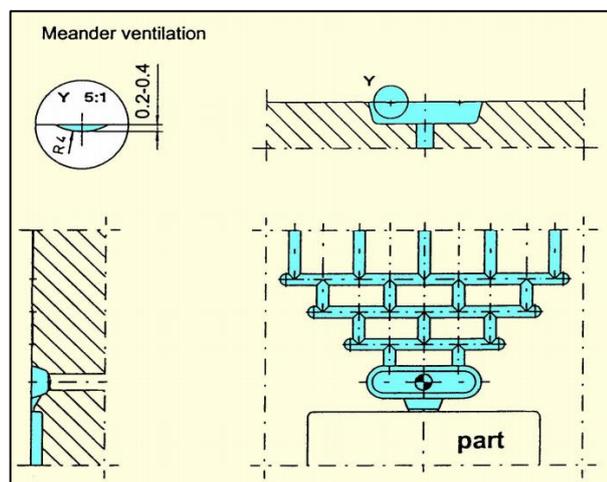
$$l = 1,5 \times \sqrt{\frac{\text{n}^\circ \text{ de entrada} \times \text{área do canal secundário}}{1,1619}}$$

$$H = l = 1,35 \times l \quad R = \frac{H}{5} \quad ACP = \frac{(L+I)}{2} \times H$$

### 3.4.2 Bolsas de gases

As bolsas de gases são cavidades abertas junto a borda da peça com o objetivo receber resíduos que permaneçam na superfície da cavidade do molde no momento da injeção. O metal ao entrar na cavidade gera estes resíduos que são conduzidos para as bolsas de gases junto com gases e ar. A falta das bolsas provoca peças com falhas de enchimento, junções frias e bolhas de gases (MALVAZI, 2008). A figura 29 mostra o formato e o dimensionamento da bolsa de gases com as suas respectivas saídas de ar no molde de injeção de alumínio sem a consideração de um sistema de vácuo.

Figura 29 Formato e o dimensionamento da bolsa e de saída de gases



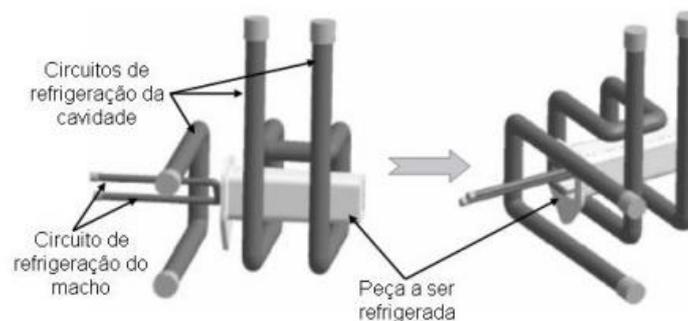
Fonte: ftp.demec.ufpr.br

### 3.4.3 Controle de temperatura do molde

Os canais do sistema de resfriamento devem ser posicionados de maneira que toda a superfície da cavidade do molde mantenha a temperatura uniforme. O acabamento superficial dos canais do sistema de resfriamento é importante tanto do ponto de vista para a refrigeração, para resistência mecânica e resistência à corrosão (UDDEHOLM).

Na figura 30 demonstra um circuito de refrigeração empregado na refrigeração de uma peça. Nesse circuito podem ser observados os canais que refrigeram a parte interna (macho) e externa da peça (cavidade). É nesses circuitos que circulam os agentes refrigerantes como a água, óleo e entre outros.

**Figura 30** Circuito de refrigeração empregado na refrigeração de uma peça

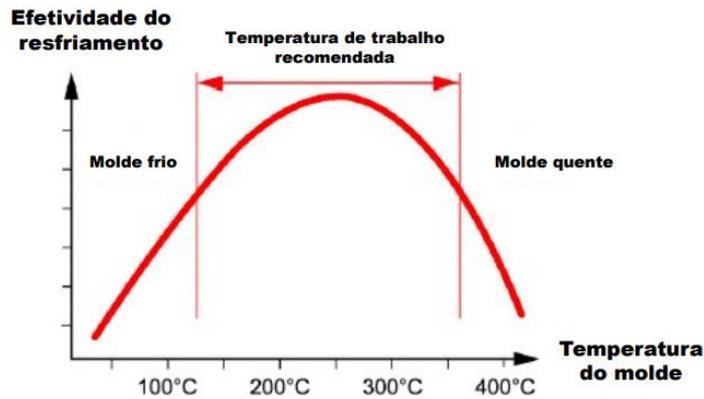


Fonte: Dissertação mestrado Sergio Luis Silva

O controle de temperatura do molde é um importante parâmetro para garantir a qualidade do injetado. O meio de controle deste parâmetro pode ser feito com o uso de água, ar, óleo ou mesmo o uso misto destes meios, através do sistema de refrigeração do ferramental, a fim de reduzir o risco de fadiga térmica. A água para resfriamento do molde pode ser pré-aquecida para cerca de 50 °C, no entanto, não é recomendado o uso de água de resfriamento com uma temperatura inferior a 20 °C durante as paradas na produção, em mais do que alguns minutos, o fluxo do refrigerante deve ser regulado de modo que o molde não fique muito frio (UDDEHOLM).

No gráfico 02 mostra a efetividade do resfriamento do molde em relação a temperatura de trabalho. Abaixo de 150°C o molde é considerado frio para o trabalho, porém, quando o molde estiver acima de 360°C é considerado molde muito quente para o trabalho. A faixa de trabalho da temperatura recomendada está entre 160°C e 350°C.

Gráfico 02 Efetividade do resfriamento do molde em relação a temperatura de trabalho

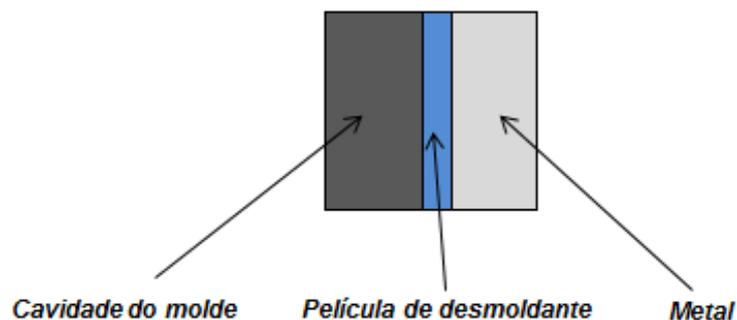


Fonte: Fuoco 2020

### 3.4.4 Lubrificação do molde de injeção

Os desmoldantes tem como principal objetivo a formação de um filme isolante entre o aço das cavidades e o alumínio líquido auxiliando na extração das peças da matriz evitando a aderência do metal no molde conforme demonstrado na figura 31.

Figura 31 Película de desmoldante aplicada sobre a cavidade e a aderência do metal líquido injetado



Fonte: MALAVAZI, 2008

Os principais desmoldantes presentes no mercado tem com agentes na composição os óleos, ceras, silicones entre outros e normalmente são diluídos em água, com as proporções de 20 a 45%, e processo as diluições são em torno de 1:30 até 1:200, dependendo de cada desmoldante e da complexidade da geometria das peças. Os sólidos são os responsáveis pela formação do filme protetor, e são conduzidos até a superfície do ferramental pela água em forma de spray.

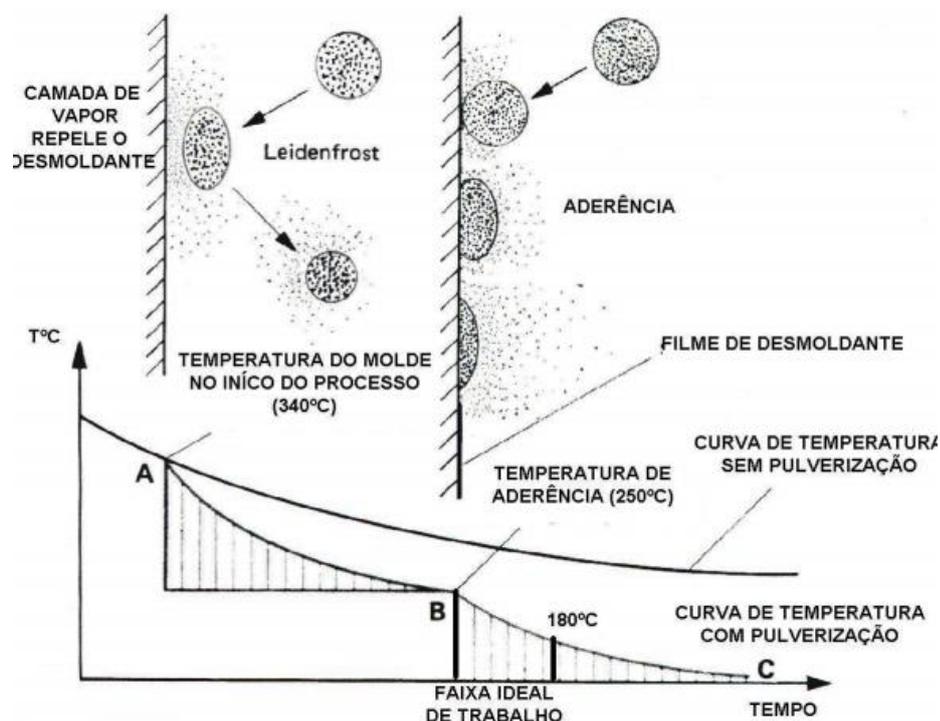
A maior dificuldade no momento da aplicação do desmoldante é o rompimento da barreira térmica na superfície de contato com o molde aquecido, pois em altas temperaturas ocorre a evaporação das gotículas de água que

conduzem os sólidos ao molde antes mesmo de tocarem a cavidade, sendo este fenômeno conhecido como Efeito *Leidenfrost*.

O efeito de Leidenfrost é um fenômeno no qual um líquido, em contato próximo com uma massa significativamente mais quente do que o seu ponto de ebulição, produz uma camada isolante de vapor que evita que o líquido evapore rapidamente (WIKIPIDEIA).

O efeito acontece quando a superfície do molde está em temperaturas acima de 300°C, portanto nestas faixas, o filme de desmoldante não se forma ou sua espessura é muito fina, o que favorece a adesão de metal no molde. Para evitar esta limitação do processo é fundamental controlar a temperatura do ferramental com a utilização de refrigeração interna para evitar excessos de aplicação de desmoldante que implica em tempos de ciclo elevados e desperdícios de produto. A figura 32 mostra o efeito da temperatura do molde na eficiência da formação do filme de desmoldante. Com a temperatura do molde em 340 °C há o efeito de Leidenfrost que é quando a camada de vapor repele o desmoldante da superfície do molde. A temperatura ideal para que o filme de desmoldante tenha aderência na superfície é de 250 °C.

**Figura 32** Efeito de Leidenfrost quando a camada de vapor repele o desmoldante da superfície do molde



Fonte: Fuoco 2020

### 3.5 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio e suas ligas é um dos materiais econômicos, atrativos e versáteis com uma série de aplicações nos segmentos automotivos, eletrodomésticos, aeronáuticos, construção civil e entre outros. Como metal de aplicação estrutural só é menor do que o uso dos aços. A densidade do alumínio é de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente  $1/3$  da do aço, o que somado à sua elevada resistência mecânica, o torna bastante útil à sua aplicação. (INFOMET, 2017).

#### 3.5.1 Classificação e propriedades

As ligas com base em alumínio não-ligado contêm entre 99,0% e 99,5% de alumínio, sendo o restante, principalmente, ferro e silício. Pode-se obter metal com pureza maior do que 99,5% de alumínio, até 99,99%, a um custo muito mais elevado, que é usado quando se requer alta condutividade elétrica ou elevada resistência à corrosão (ABAL, 2007).

O limite de resistência à tração é a tensão máxima que qualquer material pode resistir antes da ruptura. O limite de resistência à tração do alumínio puro recozido é aproximadamente 48 MPa ( $4,9 \text{ kgf/mm}^2$ ). Este valor aumenta em função de acordo com as ligas, do trabalho a frio e do tratamento térmico utilizado quando possível, (ABAL, 2007).

O limite de escoamento é a tensão em que todo o material começa a se deformar plasticamente. Para o alumínio essa deformação é de 0,2% do comprimento original realizado em medição de um corpo-de-prova normal. O limite de escoamento do alumínio puro recozido é aproximadamente 12,7 MPa ( $1,3 \text{ kgf/mm}^2$ ). Com o trabalho a frio e o tratamento térmico há o aumento deste limite mais rapidamente do que a resistência à tração final (ABAL, 2007).

O alongamento é a porcentagem relativo à diferença do comprimento original medido em um corpo-de-prova normal entre os pontos de referência, antes e após o ensaio de tração e é a indicação da ductilidade do material. (ABAL, 2007).

A dureza de um material é definida como a medida da sua resistência à penetração. Existem várias maneiras de se determinar a dureza, sendo as mais comuns a *Brinell*, a *Vickers* e a *Rockwell*. Os elementos de liga aumentam em muito a resistência do alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo

trabalho a frio, porém a dureza é significativamente mais baixa do que a maioria dos aços (ABAL, 2007).

### 3.5.2 Ligas de alumínio fundidas para fundição sob pressão

A classificação das ligas de alumínio é adotada pelos órgãos norte americanos como a “*The American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *The Society of Automotive Engineers (SAE)* e especificações militares do governo federal daquele país” (AFS - ALUMINUM CASTING TECHNOLOGY, 1993). Neste sistema, os principais elementos de liga e certas combinações de elementos são indicadas por uma série de 4 números, conforme é mostrado na tabela 06. Tomando como exemplo o grupo 1xx.x, os dois dígitos (x) à esquerda do ponto decimal indicam o teor de alumínio mínimo acima de 99 % na liga. Se a liga tem o número 190.x, por exemplo, o teor de alumínio é de 99,90 %. O dígito (x) à direita do ponto indica a forma do produto, sendo: xxx.0 define a composição limite aplicada para as peças fundidas e xxx.1 e xxx.2 indica a composição específica de lingotes para uso em fundição. Nos grupos de ligas de 2xx.x até 9xx.x, os dois dígitos (x) à esquerda do ponto não possuem significância específica e servem somente para identificar as diferentes ligas no grupo. O último dígito à direita do ponto decimal identifica a forma do produto (GRUZLESKI; CLOSSET, 1990).

**Tabela 06** Forma de classificação das séries das ligas de alumínio utilizadas no mercado pelas indústrias. Na dissertação a liga utiliza A380 é classificada na série 3.000

<p>Na série 1, indica teor de alumínio &gt; 99 % .</p> <p>Nas demais séries indicam as diferentes ligas na série.</p> <th data-bbox="587 1442 852 1496">Séries</th> <th data-bbox="858 1442 1359 1496">Tipo de liga</th>	Séries	Tipo de liga
	<p>0 = peças fundidas 1 e 2 = lingotes para uso em fundição Todas as séries</p>	1xx.x
2xx.x		Al + Cu
3xx.x		Al + (Si-Mg), (Si-Cu), ou (Si-Mg-Cu)
4xx.x		Al + Si
5xx.x		Al + Mg
6xx.x		Série que não esta em uso
7xx.x		Al + Zn
8xx.x		Al + Sn
9xx.x		Série que não esta em uso

Fonte: Aluminum Casting Technology, 1993; Gruzleski; Closset, 1990; ASM Handbook Casting, 2004.

**Tabela 07 Demonstra a faixa de composição química das principais ligas comerciais de alumínio de acordo com a Aluminum Association, na dissertação será a liga A 380 da série 3.000**

LIGAS	Si	Mg	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
1xx.x (>99 % Al)	0,1-0,15	---	0,15-0,35	---	---	0,25-0,8	---	0,05-0,1	0,05
2xx.x (Cu)	0,05-3,5	0,03-2,3	0,06-0,35	0,15-0,4	0,05-0,7	0,04-1,5	0,03-2,3	3,5-10,7	0,05-2,5
3xx.x (Si+Cu/Mg)	4,5-23,0	0,03-1,5	0,04-0,25	0,05-0,35	0,03-0,8	0,06-1,5	0,1-3,0	0,03-5,0	0,03-4,5
4xx.x (Si)	3,3-13	0,05-0,1	0,2-0,25	0,25	0,05-0,5	0,12-1,3	0,05-0,5	0,05-1,0	0,05-0,5
5xx.x (Mg)	0,1-2,2	1,4-10,6	0,1-0,25	0,25	0,05-0,6	0,1-1,3	0,05-0,4	0,05-0,3	0,05-0,2
7xx.x (Zn)	0,1-0,3	0,2-2,4	0,1-0,25	0,06-0,6	0,05-0,6	0,1-1,4	0,15	0,1-1,0	2,0-7,8
8xx.x (Sn)	0,4-6,5	0,1-0,9	0,2	---	0,1-0,5	0,5-0,7	0,3-1,5	0,7-4,0	Sn, 5,5-7,0

Fonte: Adaptado, DUARTE, 2014, p. 28.

Segundo (ANDRADE, 2019) a qualidade esperada de seus produtos fundidos no processo sob pressão exige que as ligas tenham as propriedades superiores às daquelas utilizadas nos processos de fundição convencionais. As contrações que as peças sofrem na solidificação fazem com que fundibilidade (*castability*) seja um requisito importante destas ligas. Não se tem um conceito de fundibilidade precisamente definido, mas é compreendido que uma peça fundível é aquela tem a maior facilidade para ser moldada na forma de um produto fundido de alta qualidade. Uma peça fundível requer baixa energia para ser produzida e sua fundibilidade é influenciada por fatores como a temperatura de vazamento, fluidez, contração de solidificação e sua tendência à formação de escória (RAVI, 2006).

A família das ligas de Alumínio-Silício são as mais utilizadas no processo de fundição e dentre elas, a liga 380.0 que é demonstrado na tabela 08 e suas variações abrangem cerca de 85% da produção total de peças fundidas sob pressão. Suas propriedades incluem boa resistência mecânica, dureza e resistência à corrosão na condição de fundido em bruto, excelente fluidez e resistência à propagação de trincas a quente, aliadas a um baixo custo (KAUFMAN, 2004).

**Tabela 08 Composições nominais e limites de composição das ligas de alumínio 380.0 e A380.0**

Alloy	Type(a)	Composition, wt%												
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	Others		
												Each(b)	Total(b)	Al
380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5-9.5	2.0	3.0-4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal
A380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5-9.5	1.3	3.0-4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal

Fonte: Adaptado de KAUFMAN et al., 2004

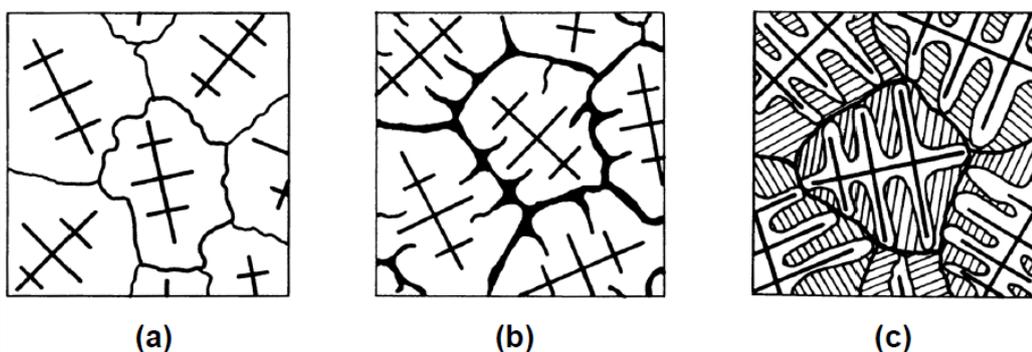
A liga 380.0 é do grupo das ligas de Alumínio-Silício-Cobre, onde a adição do cobre contribui para o aumento da resistência mecânica, melhora a usinabilidade, enquanto do silício reduz a fragilidade a quente e melhora a fundibilidade do produto fundido.

Devido a suas características superiores de fundição, ligas que têm o silício como maior constituinte de liga são aquelas de maior importância comercial. A 380.0 apresenta boas características de fundição, maior resistência mecânica e dureza e melhor usinabilidade, com baixas ductilidade e resistência à corrosão. Ela e outras ligas de aplicação geral semelhantes (como as ligas 308.0, 319.0, 360.0 e afins) são frequentemente produzidas na condição de fundido em bruto (KAUFMAN, 2004).

### 3.5.3 Solidificação das ligas de Alumínio

No processo de solidificação é importante definirmos o grão como sendo um cristal circundado ou não por eutético no estado sólido. No caso do alumínio puro, um grão é representado por um cristal de alumínio formado pelo crescimento de uma só dendrita a partir de um embrião. Na figura 33 mostra a formação dos grãos das ligas Al-Si sendo a imagem (a) a estrutura do alumínio puro; a figura (b) representa a liga hipoeutética do alumínio com predominância de solução sólida (dendritas de fase  $\alpha$ ); e a imagem (c) demonstra a liga hipoeutética do alumínio com predominância de eutético.

Figura 33 Formação do grão do alumínio puro e ligas



Fonte: DUARTE, 2014, p.54

A liga Al-Si pertence a uma estrutura eutética binária e seu ponto eutético se forma em torno de 12,6% de Si na temperatura de 577°C. Abaixo de 12,6 % a liga é denominada de hipoeutética e acima deste valor é intitulada de hipereutética.

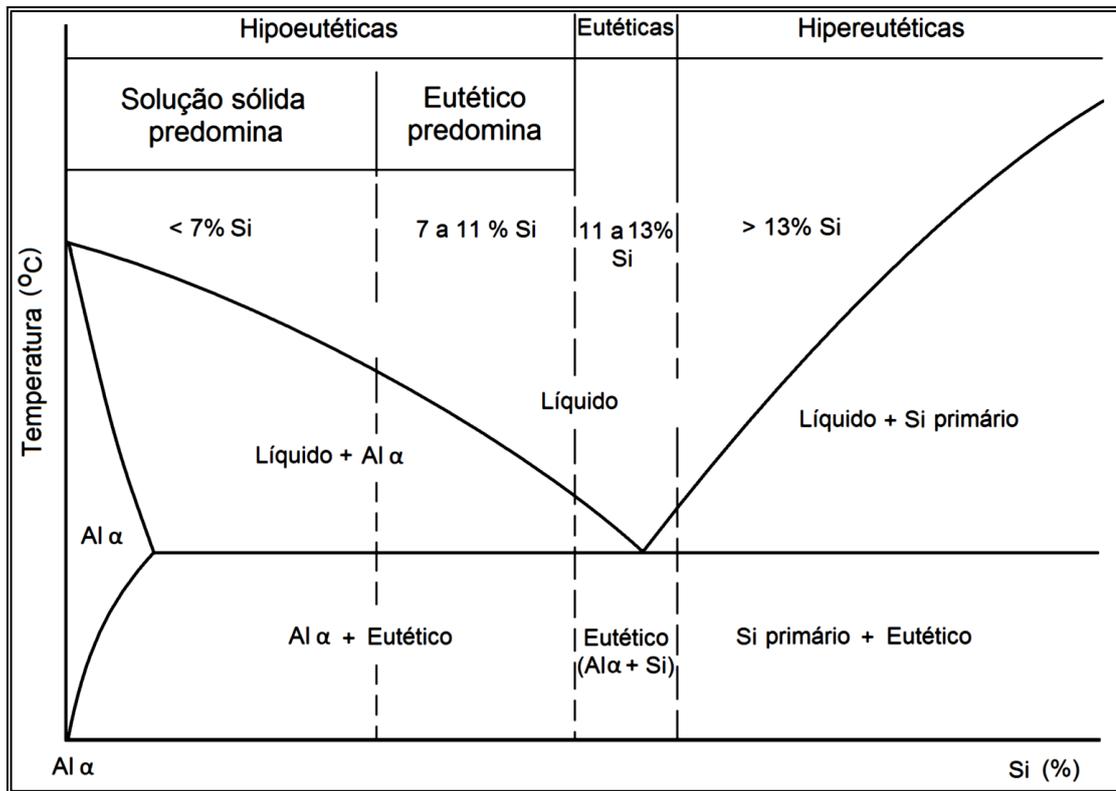
Basicamente as ligas de alumínio são formadas pela fase Alfa que é uma solução sólida de silício no alumínio contendo um máximo de 1,65% Si a 577 °C. É uma fase muito mole de baixas propriedades mecânicas e de fundição. Tem reticulado CFC. Outra fase é a Beta que é uma solução sólida de alumínio no silício contendo aproximadamente 0,5% Al a 577 °C. Ao contrário da fase anterior, esta é dura e frágil, além de ser muito abrasiva. Tem reticulado cúbico diamante. E por final a Estrutura Eutética que é dada a reação eutética, o alumínio e o silício formam simultaneamente uma estrutura de aspecto acicular, resultante da combinação da fase ALFA e fase BETA. As propriedades destas estruturas têm valores intermediários entre as duas anteriores.

O gráfico 3 apresenta o diagrama de equilíbrio Al-Si para as composições comerciais (Si de 0 a 25%). Este diagrama caracteriza-se pela presença de um ponto eutético para 12,6% Si à 577 °C. As composições comerciais encontram-se ao redor deste ponto, estendendo-se até cerca de 4,5% Si para as ligas hipoeutéticas e até 23% Si para as ligas hipereutéticas.

A principal característica da reação eutética é a transformação de metal líquido em duas fases sólidas. No caso do diagrama Al-Si, as fases formadas são a fase  $\alpha$  (Alumínio com 1,5% Si) e a fase  $\beta$  (praticamente silício puro). A solidificação de ligas com composições hipoeutéticas se dá em duas etapas com a formação de dendritas de fase  $\alpha$  e da formação de células eutéticas constituídas de fase  $\alpha$  e fase  $\beta$ .

No caso das ligas hipoeutéticas, como a composição do eutético e da fase  $\alpha$  são próximas, mesmo em ligas com 7% Si, a fração volumétrica de dendritas atinge cerca de 50% da microestrutura. Este número se eleva ainda mais para ligas de menor teor de Silício (para 5% de silício atingem cerca de 70% da fração volumétrica). Desta forma, em ligas eutéticas e hipereutéticas, o modo de solidificação é tal que mais de 90% da fase sólida se forma na temperatura do eutético.

**Gráfico 03 Diagrama binário da solidificação das ligas Al-Si**



Fonte: Diagrama de equilíbrio Al-Si (AFS - ALUMINUM CASTING TECHNOLOGY, 1993).

Na presença de outros elementos de liga, tais como Magnésio e Cobre, ocorre a formação de outra reação eutética que segue a formação de ( $\alpha + \beta$ ), respectivamente ( $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si}$ ) e ( $\alpha + \text{CuAl}_2$ ). As microestruturas brutas de fundição estão então constituídas por uma rede de dendritas de fase  $\alpha$ , com células eutéticas na região interdendrítica e na presença de Mg ou Cu, formam-se os eutéticos ( $\alpha + \text{Mg}_2\text{Si}$ ) e/ou ( $\alpha + \text{CuAl}_2$ ) nas regiões interdendríticas e intercelulares

A solidificação de peças fundidas com estas ligas apresenta como característica a formação de uma casca totalmente sólida junto ao molde, uma pequena espessura de zona pastosa (sólido + líquido) e uma região central totalmente líquida. Nestes casos, os fenômenos de segregação e de contração volumétrica associada à solidificação concentram-se nas últimas regiões a se solidificar, sendo típicas as formações de macrosegregações e de macrorrechupes.

Uma decorrência imediata do modo de solidificação destas ligas é a utilização das técnicas de solidificação direcional e de colocação de massalotes nos pontos finais de solidificação, como forma de alimentação de peças fundidas. Por outro

lado, em ligas hipereutéticas, a solidificação se inicia com a formação do(s) eutético(s).

Com este modo de solidificação, as peças fundidas com estas ligas caracterizam-se pela formação de uma casa não totalmente sólida na sua superfície, acompanhada de uma extensa zona pastosa: líquido + sólido. Para estas ligas, os fenômenos de segregação e de contração volumétrica associada à solidificação tornam-se distribuídos nas porções de líquido interdendrítico, sendo típicas as formações de microsegregações e de microrrechupes.

Como decorrência direta deste modo de solidificação, constata-se a ineficiência de massalotes e da técnica de solidificação direcional para eliminação de microrrechupes. A formação de microporosidades é, sem dúvida, o maior problema na produção de peças fundidas em ligas de alumínio hipereutéticas. Este problema decorre de dois fenômenos simultâneos que ocorrem durante a solidificação destas ligas, a saber:

- Segregação de hidrogênio para as últimas porções líquidas, em decorrência da baixa solubilidade deste gás no alumínio sólido e do modo de solidificação pastoso.
- Tendência a formação de microrrechupe em decorrência do modo de solidificação destas ligas dificuldade de alimentação interdendrítica.

#### **3.5.4 Influência dos elementos de liga nas ligas de Al**

O teor de Silício até 13% na liga de alumínio promove alta fluidez quando a liga está fundida, alta resistência a quente e menor taxa de fragilidade em temperaturas elevadas. As ligas binárias, Alumínio-Silício possuem excelente resistência à corrosão, eleva fluidez, baixa tendência a trincas de solidificação, alta condutividade de calor e elétrica, baixa dilatação e peso específico, menor usinabilidade comparando com ligas que possuem Cu ou a binária Al-Mg.

O Ferro para fundição sob pressão é recomendado em teor máximo de até 1,3%. Com teores acima de 2% causa nos produtos fundidos fragilidade, baixa resistência a choques mecânicos e baixa usinabilidade, especialmente em ligas com silício elevado, porém, com teores de 1%, causa tendência de aderência ou solda com partes do molde. Para ligas com 5% de Silício ou com 8% de Magnésio

há necessidade de um teor um pouco mais alto do que 1,3% para corrigir uma elevada tendência de solda nestas ligas.

O Cobre também é um elemento de liga importante para o processo de fundição sob pressão. Com a adição do teor de cobre na liga de alumínio melhora a fluidez, resistência à tração e a dureza, mas diminui o alongamento, a ductilidade, a fragilidade a quente e resistência à corrosão. Atualmente, somente é utilizado o cobre em ligas Alumínio-Silício-Cobre, com teores de no máximo até 4%, para o Silício com teores de 5 a 9%.

O Manganês é indicado com teores na faixa de 0,2 a 0,5% e tem como principal função amenizar os efeitos negativos do ferro em seu maior teor. A temperatura do forno de espera/manutenção abaixo de 600°C por um tempo longo pode ocorrer o risco de secreção de cristais muito duros.

As ligas binárias Alumínio-Magnésio com teores de até 8% possuem ótimas propriedades, ótima usinabilidade, a resistência à corrosão ficando possível a oxidação anódica e o peso específico inferior ao do alumínio puro.

### **3.5.5 Impurezas nas ligas de Al**

O Zinco deve ser mantido até um teor de 1%, pois com a adição diminui a viscosidade da liga, a resistência e a fragilidade a quente.

O Estanho cresce a fragilidade a quente quando os teores estão acima de 0,5 a 1% e por ser catódico ao Alumínio diminui a resistência a corrosão.

Assim como o Cobre, o Níquel em porcentagens residuais nas ligas de alumínio tende a aumentar resistência mecânica, a dureza, melhora acabamento superficial, a reduzir a resistência à corrosão da liga e como o Manganês tende a amenizar os efeitos negativos de um alto teor de ferro.

O Titânio, o Boro e Nióbio atuam no refinamento de grãos na estrutura de liga, melhora a fluidez e são adicionados banho líquido no forno, sob forma de sais.

O Cálcio é conhecido como um modificador do eutético Al-Si e considerado impureza. A principal fonte de Ca é o silício metálico, adicionado durante a produção das ligas de Al-Si. Nas ligas de alumínio, o Cálcio pode formar compostos intermetálicos com o alumínio e o silício da liga reduzindo as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão.

### 3.6 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

“Os defeitos de fundição de ligas de alumínio devem-se às variáveis metalúrgicas e de projetos de fundição” (ASM Handbook, 1998; CAMPBELL, 1991; FUOCO, 1994).

O alumínio é um metal leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza prateado fosco, devido à fina camada de óxidos que se forma rapidamente quando exposto ao ar ou com vapor de água. O alumínio não é tóxico como o metal, não magnético, e não cria faíscas quando exposto a atrito. É muito maleável, muito dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido. Tem a elevada porcentagem de contração de solidificação; alta solubilidade de hidrogênio quando no estado líquido.

Em consequência dessas características, os principais defeitos são os rechupes, microporosidades, inclusões de óxido, compostos intermetálicos e bolhas de ar. Os rechupes ocorrem como consequência da contração do metal durante a solidificação. São defeitos macroscópicos e localizam-se nas últimas regiões das peças a se solidificarem em regiões de maior massa. Sua presença na peça deve-se à falta de solidificação direcional para os massalotes, o que é caracterizado como falha no projeto de fundição (ASM Handbook, 1998; CAMPBELL, 1991).

Para eliminar ou minimizar os efeitos do rechupe, duas medidas distintas podem ser adotadas, respectivamente, a eliminação do defeito com o dimensionamento e posicionamento adequados de massalotes e utilização de resfriadores/isoladores, objetivando direcionar a solidificação de tal forma que o alimentador contenha o último líquido a se solidificar. No processo de fundição sob pressão a terceira fase de injeção (recalque ou multiplicador) com o dimensionamento de canal atenua o surgimento de defeito por rechupe.

A segunda medida é a dispersão para minimizar os efeitos do rechupe em ligas Al-Si usa-se ligas hipoeutéticas: teor de Si entre 6 e 10 %, as quais apresentam dendritas proeutéticas da fase a permeadas por líquido com composição eutética.

A solidificação do tipo pastosa caracterizada pela formação da fase a com morfologia dendrítica distribui a fase líquida em inúmeras poças isoladas,

dificultando a alimentação das contrações durante a sua solidificação. Em consequência, formam-se pequenos rechupes em forma de microporosidade (FUOCO, 1994).

Segundo (FUOCO, 1997) as microporosidades são formadas por dois mecanismos que atuam simultaneamente, a primeira pela segregação de hidrogênio para as últimas porções de líquido devido a sua alta solubilidade no alumínio líquido e baixa solubilidade no alumínio sólido, e o segundo mecanismo, pela alimentação inadequada para compensar as contrações volumétricas que ocorrem durante a solidificação das poças de líquido interdendrítico. Normalmente as variáveis de processo mais utilizadas para minimizar sua ocorrência são realizar uma desgaseificação eficiente e aumentar a velocidade de resfriamento

A escolha de ligas com composição próxima da eutética também minimiza a quantidade de poros pois a ausência da rede de dendritas torna a solidificação plana. Além disso, deve-se evitar, dentro do possível, o tratamento de modificação com sódio e com estrôncio que diminuem a capacidade de alimentação interdendrítica, aumentando a quantidade de poros (FUOCO, 1996).

Alumínio e suas ligas são muito susceptíveis à formação de óxidos, devido à alta afinidade com o oxigênio, desenvolvendo uma fina camada de  $Al_2O_3$  na superfície do banho líquido. Posteriormente, nas operações que desenvolvem turbulência no banho, esses filmes são quebrados e incorporados ao banho (ASM Handbook, 1998; CAMPBELL, 1991). Uma vez incorporados, estes óxidos sofrem transformação alotrópica, passando de alumina amorfa para alumina gama e, mais raramente chegando à alumina alfa, cada uma com suas características e provocando defeitos típicos nas peças fundidas (FUOCO, 1999).

A presença destes vários defeitos compromete a qualidade e a confiabilidade dos produtos fundidos devido à falta de estanqueidade e por reduzir as propriedades mecânicas, particularmente a ductilidade. É importante frisar que os defeitos rechupes e microporosidade têm soluções tecnológicas conhecidas, portanto passíveis de serem contornados, através de medidas preventivas.

Segundo (FUOCO,1997), outro defeito de fundição que também gera descontinuidades estruturais em componentes fundidos são as bolhas de gás, retidas no seio da peça durante a solidificação”. Sempre que ocorrer grande turbulência, haverá introdução de bolhas na massa de metal líquido. Se essa

turbulência ocorrer em transferências de metal entre painéis, haverá tempo para que ocorra sua flotação e eliminação. Porém, quando ocorre no sistema de canais durante o enchimento da peça, as bolhas serão arrastadas para dentro da cavidade do molde.

Distintamente do que ocorre com ligas de alta densidade, os óxidos formados nas ligas de alumínio têm densidade ligeiramente maior que o metal líquido, não tendendo, portanto, a sobrenadar. Por isso, qualquer movimentação da superfície líquida provoca incorporação dos óxidos formados.

Inclusões, uma vez incorporadas ao banho, se não forem removidas, tendem a ser incorporadas ao fundido, prejudicando a estanqueidade, as propriedades mecânicas, a usinabilidade e principalmente a ductilidade” (FUOCO e CABEZAS, 1999) e há alguma evidência de que a presença de filmes de óxido no alumínio líquido reduz sua fluidez” (FUOCO, 1999).

Talvez o aspecto mais importante dos filmes de óxido seja a camada de ar associada com a superfície não molhada do filme ou aprisionada nas dobras (CAMPBELL, 1991). O tamanho desta “trinca” determina a extensão do problema (FUOCO, 1999).

As porosidades são vazios ou poros preenchidos com gases onde deveria existir metal, e devido à natureza física dos metais, as peças fundidas tendem a ter porosidade. As razões mais comuns para o surgimento da porosidade são a contração devido à solidificação e a presença de gases no metal fundido (BREVICK, 2009).

Segundo (VINARCIK, 2003), vários estudos têm demonstrado como a porosidade varia com as diversas condições operacionais, e que a quantidade total de porosidade em um componente é função da contração devido à solidificação e da presença de gases inclusos. A contração resultante da solidificação é uma característica dos metais e a inclusão de gases ocorre devido às condições do processo de fundição.

Porosidade por contração ou rechupe são vazios em peças fundidas que surgem devido à mudança volumétrica que ocorre durante a solidificação das ligas fundidas. Os poros têm formato irregular não esférico, e o metal ao seu redor tem aparência dendrítica (KIRKMAN, 2006). A ocorrência deste tipo de porosidade está associada à transferência de calor do molde e ao sistema de alimentação da cavidade, sendo mais frequente em regiões de maior espessura, onde não é

possível compensar a contração do material por meio dos canais de entrada, que se solidificam rapidamente (MALAVAZI, 2008).

Em relação aos parâmetros do processo de fundição sob pressão, a temperatura do molde é um fator crítico para o controle da localização dos rechupes, bem como do tempo em que a alimentação de metal é mantida em uma determinada seção do material. Um fator de grande influência na temperatura do molde é o ritmo de trabalho, que deve ser constante, evitando-se variações no tempo de ciclo da máquina (MALAVAZI, 2008 e KIRKMAN, 2006).

Outro parâmetro importante é a pressão de compactação, que é aplicada depois da injeção, e mantida durante o tempo de solidificação. O tempo de subida desta pressão deve ser o menor possível, pois a seção do canal de ataque se solidifica rapidamente após o fim da injeção, impedindo que mais material seja injetado para compensar a contração da liga (MALAVAZI, 2008 e KIRKMAN, 2006).

A porosidade por gases é provavelmente o tipo mais comum de porosidade em peças fundidas sob pressão, e sua aparência se distingue da porosidade por contração por apresentar formato circular (bolhas) na seção em corte, com o fundo liso e brilhante na grande maioria dos casos. Ainda que o metal seja submetido a grandes pressões durante a solidificação, devido à relação geométrica entre pressão e tamanho das bolhas, a partir de pressões mais elevadas o tamanho das bolhas diminui pouco, e ainda causam como consequência o aumento de rebarbas (WALKINGTON, 2006).

Segundo (WALKINGTON, 2006), as principais causas deste tipo de porosidade são o ar aprisionado que é a causa mais provável devido à grande turbulência do fluxo e rápida taxa de preenchimento necessária ao processo. Os parâmetros de fundição sob pressão como o grau de enchimento da câmara, velocidade lenta de injeção, saídas de ar, projeto dos canais de alimentação e área de ataque influenciam diretamente na quantidade de ar aprisionado.

O vapor e gás de lubrificante antes de introduzir o metal líquido deve garantir que o molde está totalmente seco utilizando-se sistemas de sopro adequados. A fonte de geração de vapores é a mistura desmoldante a base de água, principalmente quando utilizada em excesso com a função de controlar a temperatura do molde. Outras fontes comuns são vazamentos de linhas de

refrigeração e lubrificantes de pistão, quando aplicados diretamente no interior da câmara de injeção.

### **3.6.1 Defeitos no processo de Fundição sob pressão e possíveis soluções**

Com o aumento da produção de peças fundidas no processo de fundição sob pressão e com a competitividade no mercado cada vez maior, as fundições têm a busca constante a necessidade de melhorar a qualidade e desenvolvimento de seus produtos, buscando a redução dos seus custos e dos prazos de entrega. O controle dos parâmetros do processo de fundição sob pressão e o envolvimento dos fundidores são os caminhos para se saber a causa raiz dos seus defeitos e conseqüentemente a tomada de ações preventivas reduzindo sensivelmente o índice de refugo das fundições. Os defeitos tipicamente do processo de fundição sob pressão mencionados a seguir tem como objetivo conceituar, demonstrar a causa raiz e citar as possíveis soluções para criação de planos de ações preventivas, pois afetam diretamente as propriedades mecânicas dos produtos fundidos sob pressão.

O defeito de Junta fria é caracterizado como o encontro de fluxos de metal líquido que não se caldeiam devido à baixa temperatura ocorrendo a diminuição da resistência mecânica do produto, agindo como um entalhe, favorecendo a ocorrência de trincas (WALKINGTON & MURRAY, 2003).

A figura 34 exemplifica o defeito de Junta fria ocasionado pelo encontro do fluxo do metal não ocorrendo a fusão entre as faces.

**Figura 34 Defeito de junta fria ocasionado pelo encontro do fluxo de metal líquido**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.13

Uma das soluções propostas para o defeito de Junta fria é ao iniciar a produção, as primeiras 10 (dez) injetadas devem ser refugadas em embalagem apropriada para esta finalidade. Os produtos fundidos, frequentemente, estão com excesso de graxa ou desmoldante com objetivo de sacar do produto durante a extração já que o molde ainda está frio. No início da produção, como o molde está frio, o metal líquido não o preenche perdendo temperatura de maneira muito rápida durante o enchimento da cavidade. As graxas e os resíduos de desmoldantes arrastados no momento de enchimento da cavidade do molde formam películas que separam que impedem a junção das diversas frentes de avanço do metal líquido.

Outro parâmetro que pode ocorrer a Junta fria é o ciclo longo do processo injeção que é quando o operador encontra dificuldades para posicionar os insertos na cavidade do molde ocorrendo perdas de temperatura. A solução é analisar os motivos das perdas facilitando o trabalho do operador garantindo a temperatura de operação do molde e adequar os procedimentos de refrigeração. O curso da primeira fase de injeção longa como parâmetro ocasiona um tempo maior de enchimento da cavidade do molde, ocasionando o defeito de Junta fria, ou seja, neste caso a cavidade é preenchida com a velocidade da primeira fase de injeção e o início da segunda fase de injeção lenta ocasionando baixa velocidade de injeção.

O uso do desmoldante em excesso ou em alta concentração é uma variável de processo que pode gerar o defeito de fundição por Junta fria. As possíveis soluções para a aplicação do excesso de desmoldante a regulagem da mistura do líquido desmoldante/ar, a diminuição do tempo de aplicação no molde objetivando a região de pinos e postigos como prioridades de aplicação. Para desmoldante concentrado a solução é aumentar a diluição em água entre 1:30 até 1:200, caso este esteja muito concentrado, observando as orientações de cada fornecedor e da complexidade da geometria dos produtos fundidos.

A temperatura do metal líquido é de importantes com variável de processo de injeção, pois se estiver abaixo do especificado, aumenta a possibilidade de defeito por Junta fria e a solução imediata é interromper a produção até que esta volte a temperatura especificada. O nível de impureza no metal afetará na sua viscosidade e, portanto, maior a dificuldade para o enchimento da cavidade do molde.

Com relação ao molde de injeção é de suma importância que as bolsas de gases não fiquem presas no molde e devem ser preenchidas corretamente. Evitar a interligação de bolsas de gases no molde para que os gases não retornem para a cavidade do durante seu enchimento provocando a Junta fria.

O projeto do canal de alimentação que está relacionado com a maneira de enchimento do produto fundido, sendo assim, quando há diversos fluxos de metal fundido preenchendo a cavidade do molde, haverá várias frentes de solidificação resultando em Juntas frias que podem se orientar em função da regulagem da velocidade de segunda de injeção.

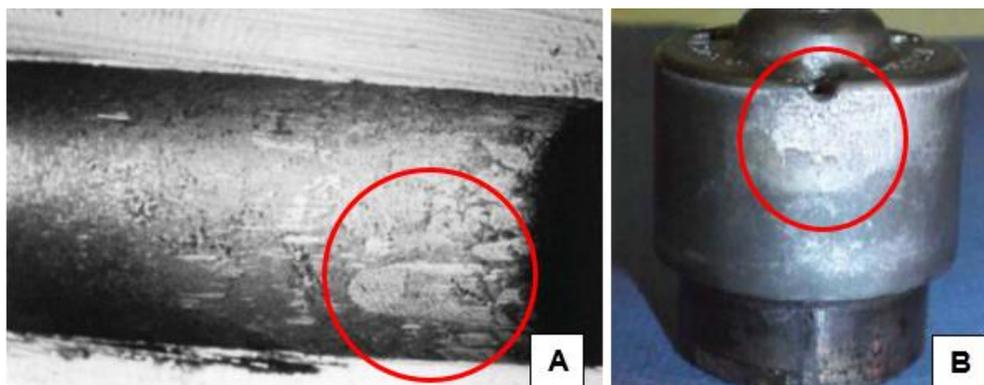
A resfriamento excessivo da cavidade do molde pode provocar a perda de temperatura do metal líquido no momento do enchimento ocorrendo a formação do defeito de Junta fria no produto fundido.

A Aderência é um defeito caracterizado pelo agarramento do metal na cavidade do molde/machos.

A remoção é feita por polimentos, e estes polimentos provocam mais erosões e o aumento da zona com depressão na cavidade do molde/machos que acentuam mais o problema de Aderência. O defeito de Aderência ocorre pela prática de lubrificação e ao projeto do canal de corte onde o fluxo do metal líquido está direcionado diretamente sobre a matriz do molde ocorrendo a erosão.

A figura 35 mostra do detalhe do defeito de Aderência ocasionado pela deficiência na lubrificação e o desgaste do molde/macho. Na figura A aderência está em um pino que compões a cavidade do molde, mas na figura B a aderência está em um macho.

**Figura 35 Detalhe do defeito de Aderência ocasionado pela deficiência na lubrificação e o desgaste do molde/macho**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.165

No processo de fundição sob pressão, a insuficiente aplicação, a proporção de diluição, tempo e a não aplicação na região adequada do desmoldante, promovem o agarramento do metal solidificado ocasionando o defeito por Aderência.

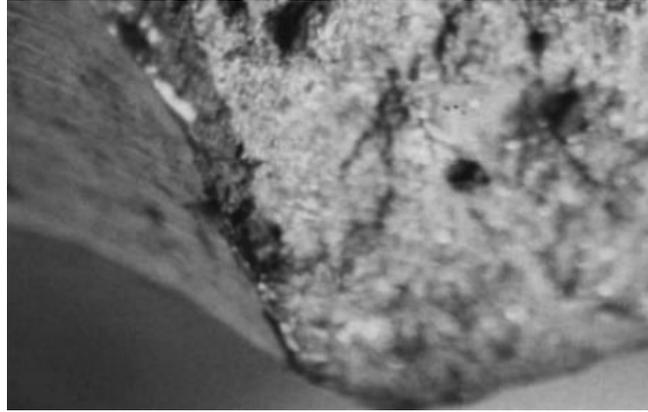
A ineficiência do projeto sistema de refrigeração eleva a temperatura do molde ocasionando o agarramento do metal solidificado na cavidade. Caso o aumento da temperatura esteja em toda a cavidade do molde/macho, deve-se controlar a vazão e a temperatura do fluido refrigerante, mas se o aumento estiver pontual, a refrigeração deve ser localizada de forma isolada do fluido refrigerante ou uma aplicação intensa de desmoldante no ponto aquecido.

O metal líquido com a temperatura elevada aumenta a aderência sobre a cavidade do molde que durante a extração quebrará o produto fundido.

A velocidade da 2ª fase de injeção muito alta ocorre a compactação da interface metal/molde e a consequência é o defeito por Aderência.

A figura 36 representa que o defeito por Trincas é ocasionado por esforços mecânicos dos componentes móveis do molde durante as etapas de abertura, extração do produto à composição química da liga do metal fundido.

**Figura 36 Detalhe do defeito por Trinca no processo de fundição sob pressão**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.130

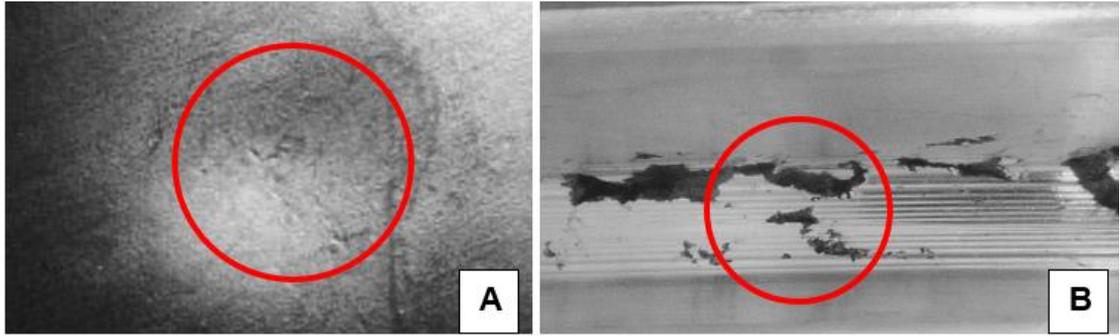
As folgas nas gavetas durante a abertura do molde de injeção, poderá ocorrer o deslocamento provocando trincas no produto fundido.

A composição química do alumínio é outra variação importante no processo de fundição sob pressão que provoca a Trinca. O elemento de liga Ferro no metal líquido é aconselhável em teor máximo de até 1,3%. Com teores de 2% causa fragilidade, baixa resistência ao choque mecânico e baixa usinabilidade, especialmente em ligas com o silício alto, mas o Ferro em teores abaixo de 1% causa aderência, gerando o defeito de Trinca no momento da extração em produtos fundidos sob no processo de fundição sob pressão.

Os defeitos de Chupagens/Rechupes são vazios provocados pela contração do metal líquido durante sua solidificação e sua ocorrência está associada às transferências de calor no molde que ocorre, preferencialmente, em regiões de maior espessura após a solidificação, e, portanto, não tem como compensar esta contração de solidificação. Chupagens são contrações que surgem externamente às peças ao passo que rechupes são as contrações internas (KAUFMAN, 2004; WALKINGTON & MURRAY, 2003).

A figura 37 representa a chupagem na imagem A formada em região de alta concentração de calor surgindo na parte externa da peça fundida, já a imagem B representa o rechupe com as suas contrações internas.

**Figura 37 Chupagem na imagem A e o Rechupe na imagem B**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.100 e 114

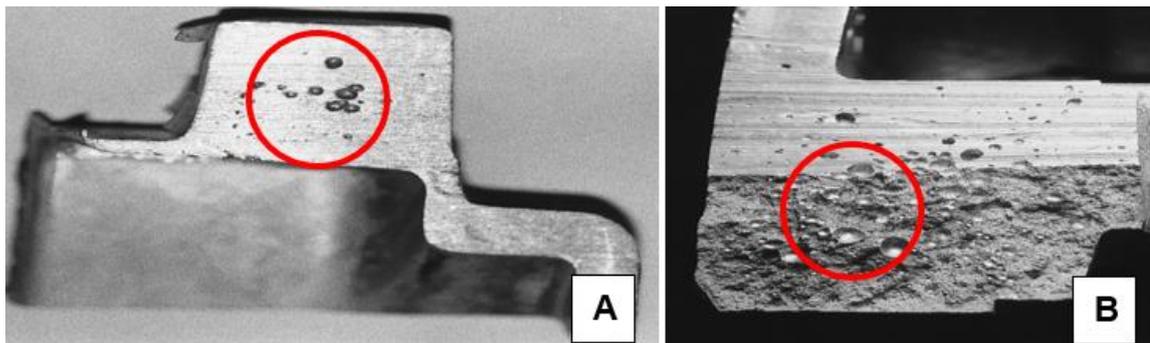
No parâmetro de regulagem da máquina injetora, na terceira fase de injeção, se o tempo de compressão ao final da injeção for insuficiente, o metal ainda no estado líquido irá se contrair formando vazios internos os rechupes ou depressões superficiais as chupagens.

As temperaturas muito altas do molde ou do metal líquido fazem com que as regiões mais espessas da peça se solidifiquem após a solidificação da entrada de material. Neste caso, é necessário reduzir a temperatura do metal ou controlar a temperatura da água que refrigera a região da entrada de material para que esta se solidifique por último. Molde com regiões muito quentes provoca ligeiras depressões superficiais no produto, nestes locais com dificuldades de troca de calor.

O defeito de bolhas é caracterizado pelo aprisionamento de gases próximos à superfície da peça durante a solidificação. É resultado de uma dilatação de ar, ou gases aprisionados durante o processo de injeção e que ficam próximas às superfícies da peça. As bolhas também são caracterizadas por seus formatos arredondados e superfícies lisas. (WALKINGTON, 2006).

A figura 38 mostra o defeito de bolha formada pelo aprisionamento de gases no momento da solidificação do metal líquido. Percebe-se que o defeito tem a característica de formato arredondado com a superfície lisa.

**Figura 38 Defeito de Bolha formada pelo aprisionamento de gases no momento da solidificação do metal líquido**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.63 e 80

A temperatura elevada do metal líquido pode provocar o defeito de Bolha formando uma fina lâmina solidificada sobre a superfície do molde, propiciando a concentração de calor nas regiões de maior espessura e conseqüentemente, propiciando a migração de gases, dissolvidos no metal durante o preenchimento da cavidade para estas regiões.

A obstrução com resíduos de alumínio ou desmoldantes nas saídas de gases do molde de injeção ou com a espessura menor que a recomendada pode provocar aprisionamento de ar que diminuirá o escape dos gases e resultando em Bolhas após solidificação do metal líquido.

Quando no canal da bolsa de ar, ou na seção do canal de corte do molde não for possível eliminar os gases presos. A solução manter o canal o mais fino possível, frio o quanto possível e aumentar a pressão do metal.

A Figura 39 detalha o defeito de Bolha de gases retido na região do canal de corte ou na região do canal da bolsa de ar.

**Figura 39 Defeito de Bolha de gases retido na região do canal de corte e o do canal da bolsa de ar**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.175

O defeito caracterizado por Falha de enchimento é originado da ausência de metal fundido durante a injeção não permitindo, portanto, o completo preenchimento da cavidade do molde. Na figura 40 mostra o detalhe do defeito de enchimento incompleto decorrente da falta de material no processo de fundição sob pressão. Detalha também que a área do canal de corte no molde de injeção está muito pequena e as dimensões estreitas, provocando o estrangulamento da entrada do material formando o defeito por falha de enchimento.

**Figura 40 Detalhe de um defeito de enchimento incompleto no processo de fundição sob pressão**

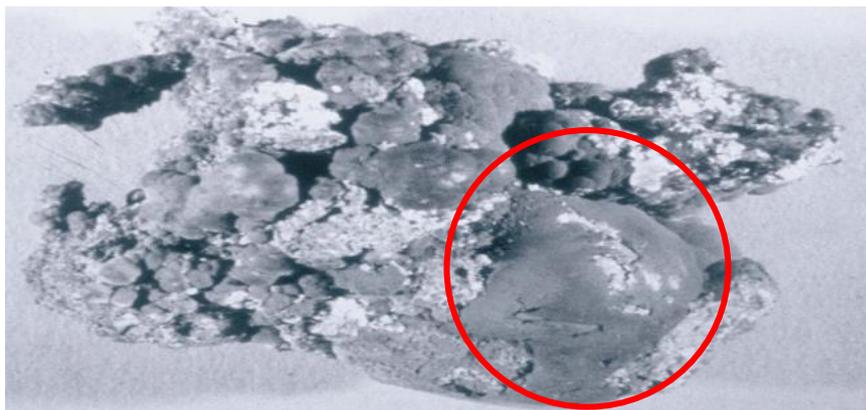


Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.185

Quando a velocidade de 2ª fase de injeção está lenta, aumenta o tempo de enchimento provocando a solidificação antecipada do produto fundido acarretando a Falha de enchimento.

O defeito por Inclusões são partículas de material que não compõe a liga fundida de um metal ou qualquer outro material não metálico, o que resultando no aprisionamento de partículas (KAUFMAN, 2004; WALKINGTON & MURRAY, 2003), que normalmente são óxidos, partículas refratárias e pode ser qualquer material estranho e essencialmente insolúvel no metal. Na figura 41 detalha a Inclusão de óxido em uma fase mais densa e muito dura ocasionada falta de limpeza do metal líquido no momento da injeção no processo de fundição sob pressão.

**Figura 41 Inclusão de óxido decorrente da injeção no processo de fundição sob pressão**



Fonte: Steven Midson, Die Casting Defects, NADCA, p.139

A prevenção de inclusões constitui, principalmente, de ações que previnam ou minimizem a oxidação do alumínio, evitem o aprisionamento de óxidos e removam aqueles eventualmente formados através de reações de escorificação ou filtração.

### **3.7 NORMA ASTM E 505 – Standard reference radiographs for inspection of aluminium and magnesium Die casting**

Esta norma é de radiografias de referência que ilustram as categorias e níveis de severidade e de descontinuidades que podem ocorrer em fundições de liga de alumínio. A norma fornecer um guia que permite o reconhecimento de descontinuidades e sua diferenciação quanto ao tipo e nível de gravidade e uma nomenclatura para referência em padrões de aceitação. Os valores indicados em libras-polegada devem ser considerados como padrão.

As descrições abaixo são para a identificação e classificação das descontinuidades no processo de fundição sob pressão, sendo aplicadas somente para as radiografias de referência.

Categoria A: porosidade - Manchas escuras suavizadas, redondas ou alongadas, que ocorrem distribuídas individualmente ou em clusters.

Categoria B: preenchimento a frio - uma linha escura distinta ou faixa de comprimento variável e contorno suave definido, geralmente contínua ou interconectada.

Categoria C: encolhimento - Áreas escurecidas filamentosas ou irregulares, geralmente contínuas ou interconectadas;

Categoria D: material estranho - irregular isolado variação na densidade do filme, mais clara ou mais escura que as áreas circundantes. Eles podem indicar a inclusão de óxido ou escória ou compostos metálicos de diferentes densidades.

A tabela 09 referencia as categorias e níveis de severidade das descontinuidades que podem ocorrer no processo de fundição sob pressão de alumínio.

**Tabela 09 Categorias das descontinuidades com as medidas em polegadas de referência para fundições sob pressão de alumínio**

Discontinuity	Plate Thickness, in. (mm)	Applicable Casting Thickness, in. (mm)
Aluminum Die Castings		
Category A (Porosity)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category A (Porosity)	½ (15.9)	
Category B (Cold fill)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category C (Shrinkage)	½ (15.9)	
Category D (Foreign material)	0.200 (5.08)	up to 1 (25.4), incl

Fonte: Norma ASTM E 505 - Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings.

A tabela 10 exemplifica as radiografias de referência que podem ser aplicadas como padrões de aceitação adaptados ao uso final do produto e deve ter como base as seguintes considerações:

Salvo indicação em contrário, descontinuidades iguais ou menor gravidade do que a radiografia de referência especificada são aceitáveis em qualquer área da unidade especificada da fundição. O tamanho da área da unidade deve ser especificado nos critérios de aceitação.

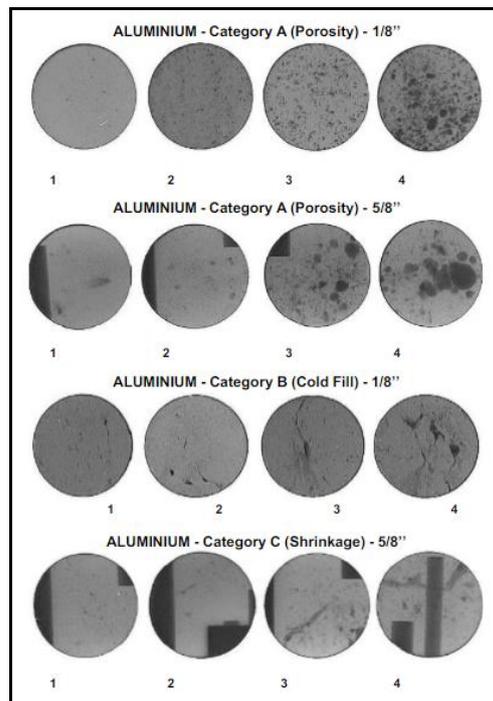
Descontinuidades mais graves do que aquelas na radiografia de referência especificada devem ser consideradas rejeitáveis e diferentes graus ou limites de aceitação podem ser especificados para cada tipo de descontinuidade. Além disso, diferentes graus podem ser especificados para várias regiões ou zonas do componente.

Pode ser necessária consideração especial quando há mais um tipo de descontinuidade na mesma área. Qualquer modificação dos critérios de aceitação exigidos com base em vários tipos de descontinuidade devem ser especificados. Quando a radiografia de referência contiver múltiplas descontinuidades, como no caso de orifícios de gás, a aceitação pode ser com base na área agregada das descontinuidades, a tamanho máximo de descontinuidade na radiografia de

referência, a espaçamento entre descontinuidades ou uma combinação destes ou outros critérios, ou ambos.

No mínimo, os critérios de aceitação devem conter endereçamento de informações; zoneamento da peça, se aplicável, nível de gravidade da aceitação para cada tipo de descontinuidade e área específica à qual as radiografias de referência devem ser aplicadas.

**Tabela 10 Referências radiografias das descontinuidades classificadas pôr categorias e por medida do defeito em polegada para fundição sob pressão conforme a Norma ASTM E 505**



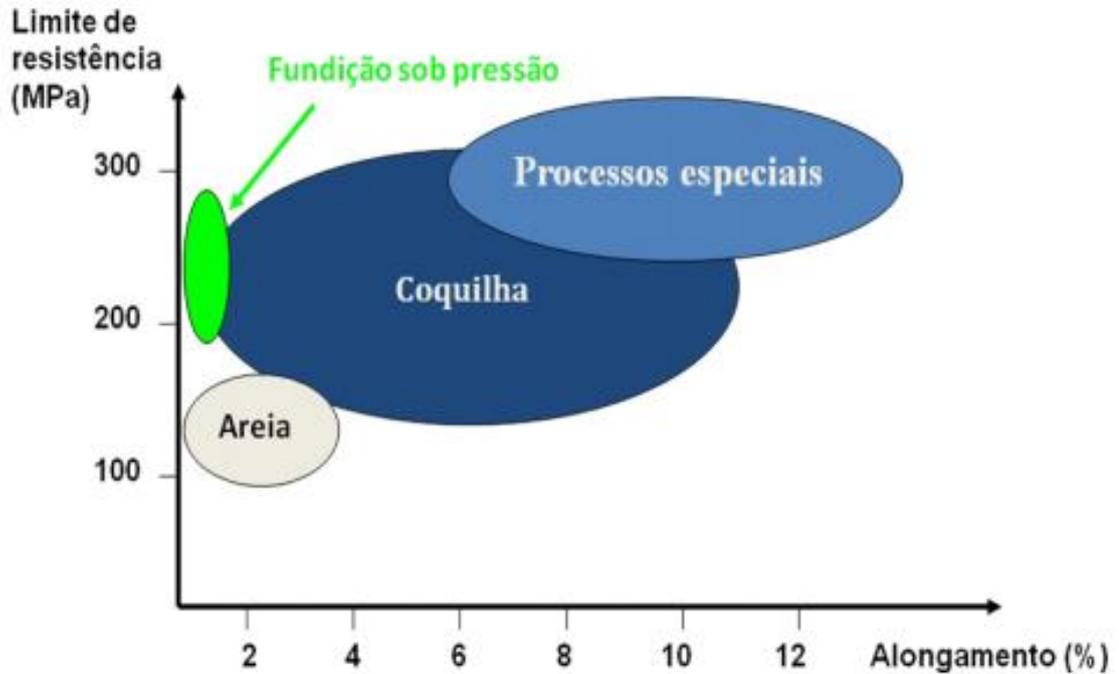
Fonte: Norma ASTM E 505 - Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings

### **3.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PRODUTOS FUNDIDOS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

Segundo (FUOCO, 2017) os produtos fundidos no processo de fundição sob pressão apresentam como característica devido as elevadas velocidades de solidificação impostas pelos moldes à baixas temperaturas uma microestrutura extremamente refinada. As taxas de resfriamento são da ordem de 50°C/s e promovem microestruturas com SDAS da ordem de 10 µm, que é muito positivo para as propriedades mecânicas das peças fundidas. Com isto, as peças injetadas de ligas de alumínio apresentam níveis de resistência mecânica de 200 a 300 MPa

no estado bruto de fundição alongamento podendo chegar até 2% com peças com nível de sanidade baixa conforme figura 42.

**Figura 42 Comparativo dos limites de resistência e percentual de alongamento para cada tipo de processo de fundição existente**



Fonte: Ricardo Fuoco, Seminário ABIFA 2017, p.28

É importante ressaltar que além do limite de resistência, o alongamento e o tamanho de grão resultante são dependentes do processo de fundição sob pressão. O nível de sanidade da peça gera a diminuição das propriedades mecânicas e da estanqueidade dos produtos fundidos. A tabela 11 compara além das propriedades, o nível de sanidade para cada processo de fundição existente.

**Tabela 11 Comparação da sanidade e das propriedades mecânicas dos produtos fundidos nos processos de fundição existentes**

Processos de fundição	Preenchimento	Alimentação	Velocidade de resfriamento	Limite de resistência	Sanidade	Ductilidade
Fundição sob pressão	Turbulento	Sob pressão	Muito alta	Alto (250 a 300 MPa)	Baixa (↑bolhas de ar preso)	Baixa ~1% (alto Fe e baixa sanidade)
Coquilha por gravidade	Exige projeto de canais	Gravidade (porosidades de rechupe se não houver solidificação direcional)	Alta	Alto (150–200 MPa)  Após TT 200-300 MPa	Alta	Alta 4 – 10%
Basculante ou baixa pressão	Controle pelo processo	Gravidade (porosidades de rechupe se não houver solidificação direcional)	Alta	Alto (150–200 MPa)  Após TT 200-300 MPa	Alta	Alta 4 – 10%
Areia gravidade	Exige projeto de canais	Gravidade (porosidades de rechupe se não houver solidificação direcional)	Baixa	Baixo (130–150 MPa)  Após TT 180-210 MPa	Baixa (↑microporosidades)	Baixa 1–3% (↑microporosidades)  Exceto com resfriador

Fonte: Ricardo Fuoco, Seminário ABIFA 2017, p.27

A presença de pequenos poros no interior das paredes não influi consideravelmente nas propriedades mecânicas, pois esse fenômeno tem contraste com o aumento da resistência e por consequência menor tamanho de grão. Não é conveniente, porém, utilizar fundição sob pressão para peças que devam suportar grandes esforços e por consequência devam ter seções espessas. A estrutura típica de uma peça fundida por pressão, na qual é visível a superfície de fratura, consiste numa parte exterior muito densa e com uma tendência de incremento de tamanho dos grãos em direção ao centro. Além disso, a aparição de poros em seções, mas espessas provoca uma diminuição das propriedades mecânicas.

Para grande maioria das peças fundidas sob pressão, não é a resistência o fator essencial que determina sua aplicação tão vasta na indústria, e sim o acabamento superficial e a tolerância dimensional da peça têm uma maior importância.

As propriedades mecânicas das ligas de Al-Si são fortemente influenciadas pelo espaçamento secundário interdendrítico SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing). Contudo, devido às propriedades físicas do alumínio, é difícil a eliminação dos defeitos, tais como filmes de óxido, microporosidade, macroporosidade: oriunda dos gases e inclusões não metálicas, que influenciam as propriedades mecânicas (RONDON, 2011). As heterogeneidades também influenciam as

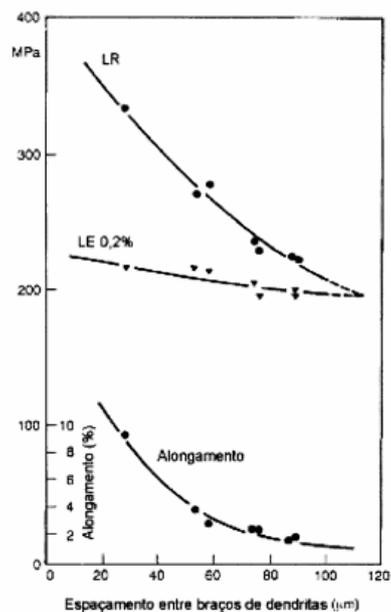
propriedades mecânicas e aparecem particularmente nos contornos de grãos, constituindo, portanto, em caminhos preferenciais de fratura (GARCIA, 2007).

Estudos revelam que o refino da microestrutura promove um aumento de valores de dureza Brinell, microdureza Vickers, resistência mecânica e resposta ao impacto (MOREIRA, 2011). Desta maneira, é conhecido que quanto menores valores de SDAS, melhores serão as propriedades mecânicas de ligas de Al-Si fundidas.

Segundo (MEDEIROS, 2009), duas formas de microporosidade podem se formar em alumínio fundidos. Uma é provocada pelo gás, através do nível de hidrogênio dissolvido no metal líquido. A outra é a formação do gás seguido da turbulência do metal líquido no processo de enchimento da cavidade do molde. A segunda formação de microporosidade é através do microrechupes do metal líquido no processo de solidificação. Esse defeito é atenuado com o projeto de solidificação direcional e no caso, de fundição sob pressão com a aplicação da terceira fase de injeção em conjunto com projeto do molde de injeção.

O tamanho de grão é diretamente proporcional à taxa de resfriamento (CAMPBELL, 1991), seções solidificadas mais rapidamente apresentam tamanho de grão mais refinados, e vazios de microrechupes, menores e mais dispersos. A influência da taxa de solidificação e do SDAS sobre a resistência mecânica e a ductibilidade estão demonstrados na figura 43.

**Figura 43** Influência da taxa de solidificação e dos SDAS sobre a resistência mecânica e a ductibilidade de uma liga fundida em alumínio

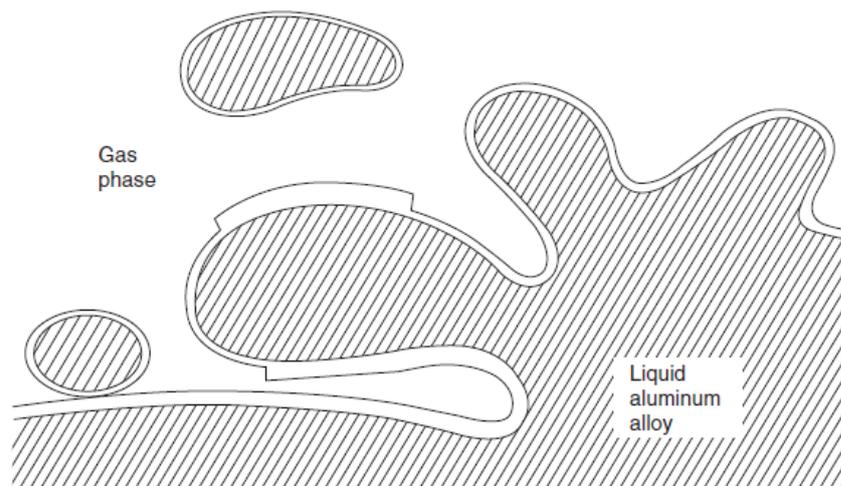


Fonte: Campbell 1991

Segundo (BONOLLO, 2015), a influência dos defeitos de fundição nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio fundido tem sido investigada por uma série de pesquisadores, com a conclusão comum de que defeitos podem tornar o comportamento de tração de ligas de fundição imprevisível. Fundições com seções finas, como as produzidas pela tecnologia de fundição sob pressão, são vulneráveis ao efeito de defeitos, uma vez que um único macro defeito pode cobrir uma fração significativa da área transversal. Espera-se que até mesmo fundições de alta integridade contenham defeitos e, portanto, é importante prever seu efeito nas propriedades mecânicas finais do produto fundido.

As propriedades mecânicas, como o limite de resistência à tração e o alongamento, sobem com o aumento da velocidade (ANDRADE 2019). Isso se deve à formação de bolhas de gás menores e mais homogêneas dispersas pela peça quando o líquido atravessa o molde. No entanto, com o acréscimo na velocidade também representa um aumento na turbulência com a qual o metal fundido caminhará pelo molde, o que pode elevar a formação de porosidades na peça injetada. A figura 44 exemplifica a formação da bolha de ar preso e a camada oxidada do metal líquido com o aumento da velocidade da primeira e segunda fase de injeção

**Figura 44 Formação da bolha de ar preso e a camada oxidada do metal líquido no processo de fundição sob pressão**

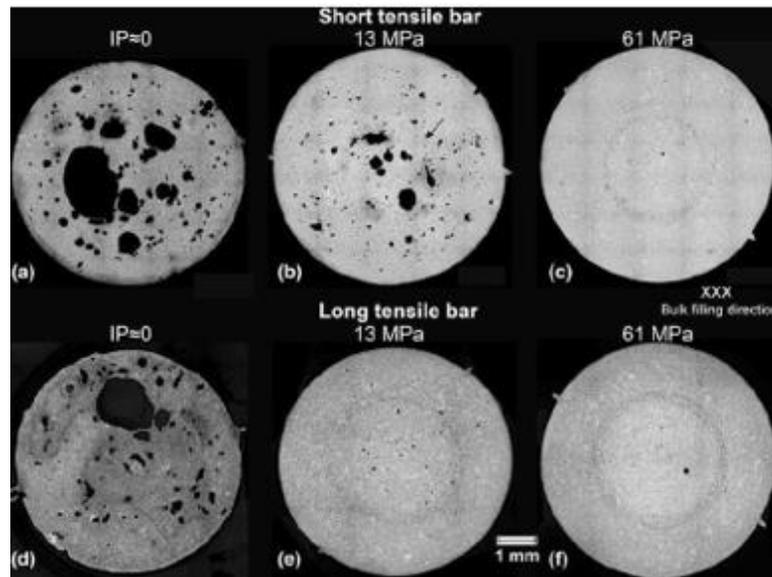


Fonte: Campbell 2011

Segundo (ANDRADE 2019), a terceira fase de injeção tem como objetivo o fechamento das bolhas de ar aprisionadas e a alimentação das contrações de solidificação, impelindo a formação de bolhas para bolsas de líquido externas à

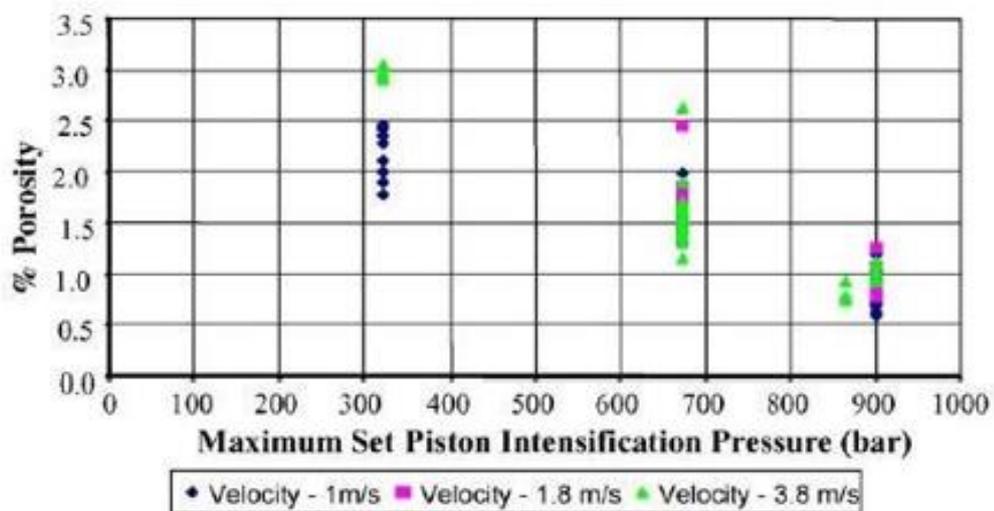
peça. Em geral, um maior valor da pressão de intensificação gera uma diminuição na quantidade de porosidade da peça, refinando sua microestrutura e melhorando os valores de dureza e resistência à tração (ADAMANE, 2015; DARGUSCH, 2006; OUTMANI, 2017). As figuras 45 e 46 mostram a correlação entre o percentual de porosidade em relação a velocidade de segunda fase de injeção e a pressão máxima de intensificação aplicada (terceira fase de injeção).

**Figura 45 Correlação entre o percentual de porosidade em relação aos parâmetros de velocidades e pressões**



Fonte: DARGUSCH et al. (2006)

**Figura 46 Correlação entre o nível de porosidade em relação a pressão máxima de intensificação aplicada (terceira fase de injeção)**



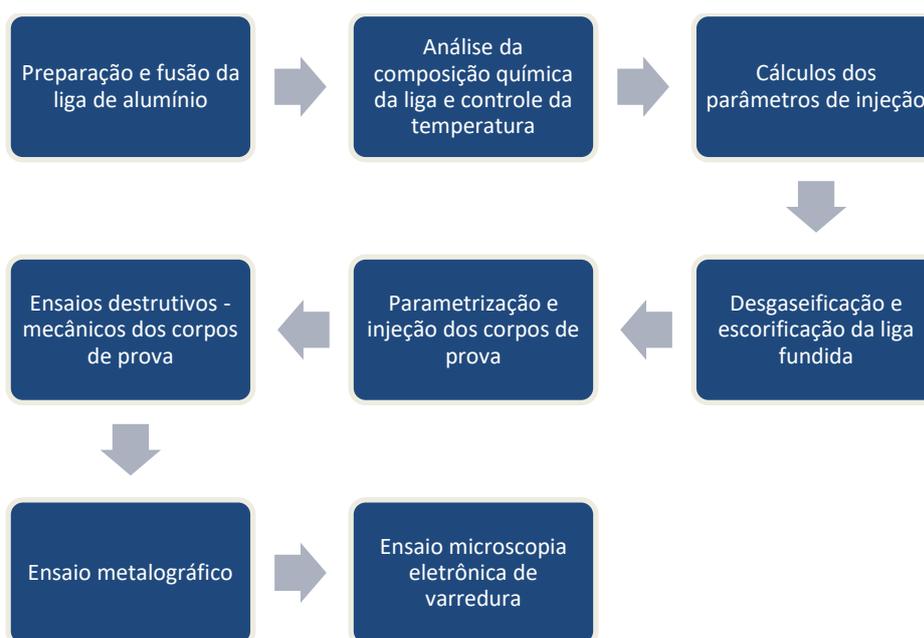
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 PROCESSO DE INJEÇÃO DO CORPO DE PROVA

Para a produção do corpo de prova fundido no processo de fundição sob pressão, há algumas etapas a serem seguidas, desde a preparação da liga, que pode vir de lingotes ou da mistura destes lingotes com o retorno de alumínio originados do processo de corte de canais, entre outros. A fusão da liga pode ser realizada em fornos de fusão específico como o forno de indução ou a gás GLP. A qualidade do metal líquido é realizada pelos tratamentos de desgaseificação e escorificação e análise de composição química.

A parametrização da máquina injetora como suas variáveis das fases de injeção, controle de pressões de injeção, controle de temperatura do molde e do metal líquido, diluição e aplicação de desmoldantes são parâmetros definidos na ficha de processo de cada produto a ser injetado. A figura 47 mostra o fluxograma do processo de injeção desde a preparação da carga do forno/liga, a injeção do produto corpo de prova, passando pelos tratamentos do metal, os cálculos de parâmetros a inserção dos parâmetros de injeção calculados e definidos na ficha de processo de cada produto e os ensaios específicos para obtenção dos resultados.

**Figura 47 Fluxograma do processo de injeção para obtenção dos corpos de prova**



Fonte: O Autor, 2020

## **Preparação e fusão da liga de alumínio**

Foi realizado o pré-aquecimento/secagem do lingote para a remoção de umidade e outras cargas voláteis, evitando o risco de uma explosão no forno de espera da máquina injetora e diminuir a formação de escória formada pela absorção de hidrogênio quando o alumínio quente entra em contato com a umidade.

A figura 48 demonstra o forno elétrico com temperatura de fusão e espera de 650 C, com o braço mecanizado para alimentação da câmara de injeção utilizado na fusão dos lingotes da liga A380 para a injeção dos corpos de prova para os experimentos.

**Figura 48 Forno elétrico de fusão e de espera da liga A380 utilizado para a injeção dos corpos de provas**



Fonte: Autor 2020

## **Análise da composição química da liga e controle da temperatura**

A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica conforme ilustrado na figura 49 de acordo com a IT-MET-013 versão 3, avaliado pela CGRE e os resultados foram calculados pela média de 6 (seis) análises dos teores dos elementos encontrados. Trata-se de um teste realizado com a aplicação de uma carga elétrica de um eletrodo para uma amostra de metal, dentro de uma

pequena câmara de pressurização a vácuo, onde os átomos são vaporizados ionizados a um estado de alta energia chamado plasma.

**Figura 49 Equipamento de espectrometria de emissão óptica do Instituto SENAI de Tecnologia em Metalurgia da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: O Autor, 2020

O material utilizado no trabalho foi a liga de alumínio-silício com teor aproximado de 8,40%Si, sendo as amostras retiradas da liga fundida e mantida em forno de manutenção da máquina injetora.

A medição e o controle da temperatura são fundamentais em processos de fundição, que devem atender aos padrões rigorosos. O metal fundido com uma temperatura muito alta, pode espirrar metal líquido pela linha de fechamento do molde ocasionado defeitos de fundição e ocorrer acidentes, mas se a temperatura estiver muito baixa acarreta a baixa fluidez da liga e apresenta defeitos no produto fundido.

Por isso, a qualidade dos equipamentos de medição e controle de temperatura podem determinar os resultados dos produtos fundidos, quanto à forma e propriedades físicas e mecânicas desejadas, como por exemplo, o limite de resistência à tração. A figura 50 mostra o sistema de medição com a temperatura

de trabalho utilizado no Laboratório da Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.

**Figura 50 Pirômetro do forno de espera/manutenção da máquina injetora**



Fonte: O Autor, 2020

### **Cálculos dos parâmetros de injeção**

A máquina para fundição sob pressão utilizada no estudo foi de câmara fria como ilustra a figura 51, que consta de um conceito de prensa capaz de fechar as duas metades da matriz, antes da injeção, e de abri-las, depois da solidificação do metal e o forno de manutenção do metal líquido independe da máquina. Outra parte importante da máquina injetora é o pistão de injeção que empurra o metal líquido para preencher a matriz do molde de injeção com altas velocidades e pressão.

**Figura 51 Máquina injetora do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo utilizada na realização dos testes para a dissertação**



Fonte: O Autor 2020

Para se especificar uma máquina injetora, o requisito principal é se o sistema fechamento faz a força necessária para manter o molde fechado durante o processo de injeção, com uma margem de segurança para que não ocorram

espirros de metal para fora da máquina e queimem o operador; e ocasionando a perda da qualidade do produto injetado. A tabela 12 demonstra os dados para os cálculos de capacidade da máquina em injetar o corpo de prova com segurança e qualidade.

**Tabela 12 Dados técnicos da máquina injetora Frech 360 Ton. para cálculo da capacidade da injeção do corpo de prova**

<b>Máquina Injetora Frech de 360 Ton. de força de fechamento</b>	
<b>Dados para cálculo de capacidade</b>	
Pressão de linha da máquina	140 kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão do acumulador	80 kgf/cm <sup>2</sup>
Diâmetro do pistão da máquina	12 cm
Diâmetro do pistão de injeção	05 cm
Comprimento da câmara de injeção	42,5 cm
Área de moldagem do corpo de prova	255,77 cm <sup>2</sup>
Grau de enchimento da câmara de injeção	46%
Volume útil da câmara de injeção	383,66 cm <sup>3</sup>
Quantidade de alumínio do corpo de prova	1.035,88 grs
Volume da câmara de injeção	834,06 cm <sup>3</sup>
Quantidade de alumínio na câmara de injeção	2.251,96 grs

Fonte: O Autor 2020

O primeiro passo para o cálculo da capacidade da máquina em injetar o corpo de prova é calcular a força de injeção da máquina que é realizado através dos seguintes passos:

$$\text{Área do pistão da máquina} = \pi \times R^2 = 3,14 \times 6^2 = 113,04 \text{ cm}^2$$

$$\text{Força de injeção da máquina (F.I.M)} = \text{Área do pistão hidráulico} \times \text{Pressão de linha}$$

$$\text{Força de injeção da máquina (F.I.M)} = 113,04 \text{ cm}^2 \times 140 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Força de injeção da máquina (F.I.M)} = 15.825 \text{ Kgf ou } 15,8 \text{ Ton.}$$

Conhecendo a força de injeção da máquina, o segundo passo para se determinar a capacidade da máquina para injetar o corpo de prova, deve-se saber a pressão específica na câmara de injeção da máquina. Esta pressão aplicada sobre o metal é determinada pelo cálculo da área da câmara de injeção e dividindo a força de injeção da máquina por esta área.

$$\text{Área pistão/câmara de injeção da máquina} = \pi \times R^2 = 3,14 \times 2,5^2 = 19,63 \text{ cm}^2$$

$$P.E = \frac{\text{Força de injeção da máquina}}{\text{área pistão de injeção [cm}^2\text{]}} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$P.E = \frac{15.825}{19,63} = 806,19 \text{ [kg/cm}^2\text{] peça estanque}$$

O valor referencial para cada tipo de peça é também de acordo com o metal utilizado tabelado, conforme a tabela 01, o corpo de prova proposto do estudo tem pressão específica para peças estanques.

No terceiro passo para se determinar a capacidade de injeção do corpo de prova na máquina injetora, deve-se calcular a força aplicada na face de abertura do molde através da área da moldagem que inclui as peças, os canais de alimentação, as bolsas de ar e o tarugo central, observando se a peça apresentar furos, rasgos *etc.*, passante; para o cálculo da área de moldagem, considerar como a peça não tivesse estes detalhes utilizando a fórmula:

$$\text{Força de fechamento} = \text{Área de total moldagem} \times \text{Pressão específica [kgf]} \times 1,20$$

$$\text{Força de fechamento} = 255,77 \times 806,19 \times 1,20 = 247.439,06 \text{ Kgf ou } 247 \text{ Ton.}$$

Como a máquina especificada é uma Injetora *Frech* de 360 Ton de força de fechamento e com os cálculos realizados com uma margem de segurança de 20%, chegou-se a 247 Ton., portanto a máquina especificada está de acordo com os procedimentos para a realização dos testes com segurança da abertura do molde no momento da aplicação das velocidades de injeção.

A terceira fase de injeção só é solicitada quando a pressão do trabalho desejada estiver acima de 150 Kgf/cm<sup>2</sup>, pressão máxima da bomba. A regulação se dá através da válvula e a pressão conferida no manômetro de pressão de trabalho e para calcular a pressão de trabalho, usa-se a seguinte fórmula:

$$PT = \frac{PE \times d^2}{D^2} \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$$

PT = Pressão de trabalho

PE = Pressão específica

d<sup>2</sup> = Diâmetro do pistão de injeção

D<sup>2</sup> = Diâmetro do pistão hidráulico

$$PT = \frac{806 \times 5^2}{12^2} = 140 \text{ Kgf/cm}^2$$

Para a injeção dos corpos de prova a pressão de trabalho de 140 Kgf/cm<sup>2</sup> foi o suficiente o processo sem a necessidade da utilização da terceira fase de injeção.

**Cálculo do comprimento da primeira fase de injeção.**

Além da velocidade de injeção para se evitar a formação da onda na cabeça do pistão de injeção e o aprisionamento de ar no metal líquido na primeira fase de injeção, é importante a definição do percurso percorrido pelo metal dentro da câmara de injeção, definindo o comprimento desta etapa do processo de injeção, aplicando seguinte fórmula:

$$C1 = A - B - \frac{(476,8 \times P)}{D^2} \text{ [mm]}$$

$$C1 = 425 - 0 - \frac{(476,8 \times 1.035,88)}{50^2}$$

$$C1 = 227,60 \text{ mm ou } 22,76 \text{ cm}$$

Onde:

C1 = Curso da 1ª fase (em milímetros).

A = Dimensão da câmara (em milímetros).

B = Comprimento do bloco difusor (em milímetros).

P = Peso da peça + bolsa de ar + tarugo (em gramas).

D = Diâmetro do pistão (em milímetros).

Obs: Quando o molde não possuir bloco difusor a dimensão B será 0 (zero).

Também como parâmetro para o processo de fundição sob pressão, o comprimento da segunda fase de injeção é utilizado como referência para o ponto de início de injeção utilizando o cálculo para a determinação do comprimento seguindo a seguinte expressão:

$$C2 = CI - C1$$

$$CI = A - ET \text{ ou } CI = A - (ET + B)$$

ET: Espessura do tarugo, pode variar de 20 a 30 mm

C1: Curso da primeira fase varia de molde para molde

CI: Curso de injeção depende do curso da primeira fase, do comprimento do tarugo e comprimento da câmara.

$$CI = A - (ET + B)$$

$$CI = 425 - (24 + 0)$$

$$CI = 401 \text{ mm ou } 40,1 \text{ cm}$$

$$C2 = CI - C1$$

$$C2 = 401 - 227,60$$

$$C2 = 173,4 \text{ mm ou } 17,34 \text{ cm}$$

## **Molde de Injeção**

Molde de injeção é fabricado em aço e deve suportar às variações de temperatura decorrentes do processo ou seja, aquecimento e resfriamentos rápidos que induzem, ao longo do tempo, a microtrincas superficiais no molde e que são transferidas para o produto prejudicando seu aspecto superficial.

Os moldes para injeção são ferramentas de alto valor agregado e em razão disto o desgaste e falhas prematuras representam perdas consideráveis para a indústria de fundição. A ação sinérgica de fatores como o tipo adequado de aço, projeto, usinagem, processos térmicos, *tryout*, processos termoquímicos, máquina de injeção adequada e em boas condições, e a correta utilização do molde resultam na maximização do desempenho do molde.

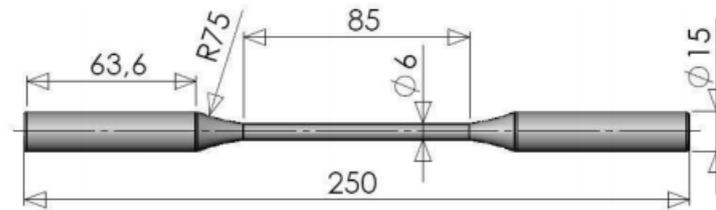
Normalmente, as matrizes do molde, aquele que entra em contato direto com o metal líquido, são fabricadas em aços especiais (H13) que suportam elevadas temperaturas de trabalho bem com choques térmicos.

Os corpos de prova injetados estão de acordo com a norma ABNT NBR7549-2001. A temperatura de trabalho do molde durante o processo de injeção ficou entre 90 e 120 °C. A figura 52 mostra as dimensões do corpo de prova injetado. Para o ensaio de tração não foi necessário realizar usinagem nos corpos de prova injetados, devido ao excelente acabamento superficial que eles apresentavam.

Foi realizada a injeção da liga A380 em uma matriz metálica com as cavidades de corpos de prova para tração. Vale destacar que neste molde existem 6 cavidades, sendo produto de cada ciclo de injeção a obtenção de seis corpos de prova. A figura 53 mostra a parte fixa do molde com seis cavidades utilizado no processo de fundição sob pressão do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo e a figura B como o corpo de prova injetado no processo

O molde injeção utilizado no estudo é composto por seis cavidades com as dimensões dos corpos de prova especificadas no desenho apresentado na figura 57, conforme a norma ABNT NBR 7549:2008.

**Figura 52** Croqui do corpo de prova adaptado pela ABNT NBR 7549:2008 utilizado para injeção dos fundidos



Fonte: Ibere Duarte, 2007 pg 91

**Legenda:**

- C = comprimento mínimo das cabeças
- E= espessura
- G= largura das cabeças aproximada
- L= largura
- M= largura entre as marcas
- R = raio mínimo de concordância
- U= comprimento útil

**Tabela 13** Medidas do corpo de prova adaptado pela ABNT NBR 7549:2008

Medida	Dimensões (mm)
Medida entre castanhas mínima (B)	125
Diâmetro (D) <sup>a</sup>	6 ± 0,10
Diâmetro das cabeças aproximado (G)	15
Comprimento entre as marcas (M)	60 ± 0,10
Raio de concordância mínimo (R)	75
Comprimento total mínimo (T)	250
Comprimento útil mínimo (U)	75
<sup>a</sup> o diâmetro do comprimento útil pode ser diminuído gradativamente das extremidades até o centro (dimensão de controle), com diferença máxima de 0,10 mm.	

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 7549:2008, 2019

**Figura 53** Figura A é a parte fixa do molde utilizado no Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo e a figura B como o corpo de prova injetado



Fonte: O Autor 2020

## Dimensionamento do projeto de sistema de canais do molde de corpo de prova

O sistema de canais de enchimento no processo de fundição sob pressão deve ser dimensionado de forma a dar bom escoamento à liga fundida, a velocidade de enchimento desejada e a pressão suficiente sobre o metal injetado, fazendo a função de alimentador, massalote, no momento de contração do metal líquido dentro da cavidade do molde. Para o cálculo deve-se obedecer a sequência de primeiro o canal de corte, em seguida, o canal secundário, e por último, o canal primário. A tabela 14 demonstra os dados para projetar o sistema de canais de enchimento no processo de fundição sob pressão.

**Tabela 14 Dados para cálculo do projeto do sistema de canais para o molde do corpo de prova no processo de fundição sob pressão**

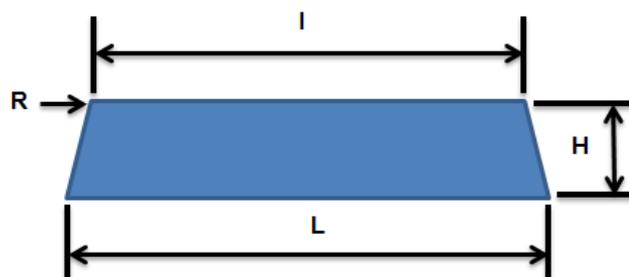
Peso da peça	150 grs
Volume da peça	55,55 cm <sup>3</sup>
Espessura da peça	12 mm
Tempo de enchimento	0,050 s
Velocidade de enchimento	3.658 cm/s

Fonte: O Autor 2020

### Cálculo para determinar a área do canal de corte

Para o projeto do sistema de canais de enchimento é importante observar que o formato dos canais de corte, secundário e primário deverá ser de forma trapezoidal, pois é o formato com melhor resultado conseguido na prática, conforme demonstrado na figura 54. O comprimento dos canais conforme distribuição das cavidades, deverá ser o menor possível para reduzir a perda de temperatura e pressão na cavidade.

**Figura 54 Formato trapezoidal do sistema de canal do processo de fundição sob pressão e suas regiões a serem dimensionadas**



Fonte: O Autor, 2020

### Cálculo do canal de corte

$$ACC = \frac{\text{Volume da peça}}{\text{Tempo de enchimento} \times \text{Velocidade de enchimento}} \text{ [m}^2 \text{ ou cm}^2\text{]}$$

$$ACC = \frac{55,55}{0,050 \times 3.658} = 0,31 \text{ cm}^2$$

$$ACC = \frac{(L+I)}{2} \times H \Rightarrow ACC = \frac{(0,85+0,71)}{2} \times 0,4 = 0,31 \text{ cm}^2$$

### Canal Secundário

$$I = 1,5 \times \sqrt{\frac{n^\circ \text{ de entrada} \times \text{área do canal de corte}}{1,1619}} \Rightarrow I = 1,5 \times \sqrt{\frac{6 \times 0,31}{1,1619}} = 1,51 \text{ cm}$$

$$H = I \Rightarrow H = 1,51 \text{ cm} \quad L = 1,35 \times I \Rightarrow L = 1,35 \times 1,51 = 2,045 \text{ cm}$$

$$R = \frac{H}{5} = \frac{1,51}{5} = 0,30 \text{ cm} \quad ACS = \frac{(L+I)}{2} \times H \Rightarrow ACS = \frac{(2,045+1,51)}{2} \times 1,51$$

$$ACS = 2,69 \text{ cm}^2$$

### Canal Primário

$$I = 1,5 \times \sqrt{\frac{n^\circ \text{ de entrada} \times \text{área canal secundário}}{1,1619}} \Rightarrow I = 1,5 \times \sqrt{\frac{1 \times 2,69}{1,1619}} = 2,27 \text{ cm}$$

$$H = I \Rightarrow H = 2,27 \text{ cm} \quad L = 1,35 \times I \Rightarrow L = 1,35 \times 2,27 = 3,07 \text{ cm}$$

$$R = \frac{H}{5} = \frac{2,27}{5} = 0,45 \text{ cm} \quad ACS = \frac{(L+I)}{2} \times H \Rightarrow ACS = \frac{(2,27+3,07)}{2} \times 2,27$$

$$ACP = 6,06 \text{ cm}^2$$

### Desgaseificação e escorificação da liga A380

Dentre os processos de desgaseificação como a pastilha de hexacloretano e o plug poroso, o FDU (Foundry Degassing Unit) é um dos mais utilizados atualmente. A desgaseificação neste processo consiste em um rotor central que introduz um gás inerte no centro do metal fundido, onde as bolhas emergentes são fragmentadas e dispersas pela rápida rotação do rotor.

Na máquina há ainda placa defletora localizada ao lado do rotor com a principal função de auxiliar na retenção da escória durante o processo de desgaseificação.

O tempo de desgaseificação depende da liga de alumínio e da quantidade de hidrogênio dissolvido e normalmente geralmente é de 5 a 10 minutos para cada 300 kg de alumínio e o cilindro de nitrogênio deve ter uma pressão superior aos 5 bar e a vazão de nitrogênio deve variar de 15 a 25 l/min.

O processo de desgaseificação da liga de alumínio foi realizado diretamente no forno elétrico de fusão/manutenção. A figura 55 mostra o processo Foundry Degassing Unit (FDU) do alumínio com a utilização do rotor mecânico, a placa defletora e a imersão de gás inerte nitrogênio ou argônio do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.

**Figura 55 Foundry Degassing Unit (FDU) do Laboratório de Fundição da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: Autor, 2020

Para a desgaseificação da liga A380 foram definidos os parâmetros de tempo de desgaseificação, a vazão de nitrogênio e a temperatura de vazamento do alumínio sobre uma carga metálica fundida no forno elétrico/manutenção como está representado na tabela 15.

**Tabela 15 Parâmetros de regulação do processo de desgaseificação do alumínio líquido para a injeção dos corpos de prova**

Variáveis	Valores utilizados
Carga de alumínio	500 kgs
Tempo de Desgaseificação $t$	15 min
Vazão de Nitrogênio $v$	18 l/min
Temperatura do alumínio	650 °C

Fonte: O Autor 2020

Os fluxos escorificantes são adicionados à superfície do metal líquido antes do processo de injeção para formar uma escória de impurezas que flota na superfície do banho metálico, facilitando a remoção desta. A escorificação também é utilizado para evitar o excesso de óxidos e inclusões não metálicas das paredes dos fornos e do próprio banho metálico.

Para o processo de escorificação do metal líquido foi utilizado o Alfa flux 18C da empresa Alfa Trend Indústria e Comércio Ltda recomenda a quantidade de 0,05 a 0,1% do peso de metal fundido a ser desgaseificado. A tabela 16 demonstra as substâncias que compõe o escorificante e suas respectivas concentrações que foram indicadas pela FISQP (Ficha de Informação de Segurança dos Produtos Químicos) da Alfa Trend. A quantidade utilizada foi de 0,1% para a capacidade de 500 kgs de metal líquido no forno de manutenção da máquina injetora.

**Tabela 16 Substância/concentração e a quantidade utilizada do escorificante**

Substância	Concentração
Cloretos	45 – 50
Sódio	25 – 35
Potássio	20 – 25
Fluossilicato de sódio	10 – 15
Quantidade utilizada	50 grs

Fonte: FISQP da Alfa Trend

### **Parametrização e injeção dos corpos de prova**

O processo de fundição sob pressão, como em qualquer outro processo produtivo, muitas são as variáveis que influenciam nos resultados desejados,

contudo, os parâmetros que impactam diretamente nas propriedades mecânicas do produto fundido, estão representados na tabela 17 que foram parâmetros fixados no momento das definições de parametrização, mas que não faz parte do estudo proposto.

**Tabela 17 Variáveis de processo que impactam diretamente nas propriedades mecânicas do fundido, mas que não faz parte do estudo proposto**

<b>Parâmetros fixos de injeção</b>	
<b>Temperatura da liga</b>	650°C
<b>Diluição do desmoldante</b>	1/100 L
<b>Tempo de Ciclo</b>	32 segundos
<b>Tempo de injeção</b>	5 segundos
<b>Tempo de resfriamento</b>	4,5 segundos
<b>Tempo extração</b>	2 segundos
<b>Grau de enchimento</b>	46%
<b>Posição de início da 1ª fase</b>	227,6 mm
<b>Posição de início da 3ª fase</b>	173,4 mm
<b>Curso de injeção</b>	425 mm

Fonte: O Autor, 2019

Para estudar a influência dos parâmetros da velocidade no processo de fundição sob pressão, foram utilizadas 6 (seis) variáveis de velocidades com 42 ciclos de injeção de 6 (seis) corpos de prova cada, totalizando 252 corpos de prova de tração para o estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de peças fundidas sob pressão em liga de alumínio SAE 380 relacionadas às variações das velocidades das fases de injeção, conforme tabela 18 que mostra as variações das velocidades da primeira, segunda de injeção e os parâmetros de velocidades também fixados e programados na máquina injetora.

**Tabela 18 Variações das velocidades da primeira e, segunda fase de injeção e os parâmetros de velocidades**

<b>Variações da primeira fase de injeção</b>	
10%	0,1 m/s
25%	0,25 m/s
50%	0,50 m/s
<b>Parâmetros fixados</b>	
30% da segunda fase de injeção	1,8 m/s
<b>Variações da segunda fase de injeção</b>	
10%	0,6 m/s

25%	1,5 m/s
50%	3,0 m/s
<b>Parâmetros fixados</b>	
25% da primeira fase de injeção	0,25 m/s

Fonte: O Autor, 2020

## 4.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS – MECÂNICOS

Os ensaios destrutivos são os mais utilizados para determinar ou verificar as propriedades dos materiais. São também adequados para medir a capacidade de suportar esforço de uma peça.

Ensaio destrutivo são ensaios mecânicos que necessitam de procedimentos que provocam inutilidade nos materiais ou nos corpos de prova, mesmo que o dano seja pequeno. O ensaio de dureza, em certos casos, produz um pequeno dano. Esse efeito marca não chega a destruir a peça ensaiada, porém deixa sinais que serão pontos de concentração de tensão e fonte de possíveis falhas.

O conhecimento das propriedades dos materiais, muitas vezes, só é possível pela aplicação de ensaios que levam à destruição dos materiais. Nesses casos, na maioria das vezes, são usados corpos de prova do mesmo material das peças construídos segundo normas próprias.

### 4.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força, que, ao agir sobre uma superfície de um corpo sólido provoca uma deformação na direção do esforço produzindo uma pressão. Quando essa força tende ao alongamento, acontece o que é denominado de tensão de tração. Há uma relação entre tensão aplicada carga sobre área da secção transversal da peça e a deformação resultante.

Os ensaios de tração foram executados em 60 corpos de provas em uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 60 toneladas da marca EMIC do Laboratório de Ensaio mecânicos da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo conforme figura 56, com *software* Bimac e velocidade de tração do travessão de 4 mm/min. Foi utilizado um extensômetro longitudinal marca EMIC com base de medida de 50 mm para obtenção do alongamento e limite de escoamento. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2018.

**Figura 56** Máquina de ensaios universal da do Laboratório de Ensaio Mecânico da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo utilizada nos ensaios deste trabalho



Fonte: O Autor, 2020

Após a realização dos ensaios de tração, os resultados: das médias do limite de escoamento; da taxa de alongamento; e a própria resistência à tração das variações parametrizadas das velocidades da primeira e segunda fases de injeção, foram transformados em variáveis numéricas como estão demonstradas nas tabelas 20, 21, 23 e 24 mencionadas no capítulo Análise e Resultados.

#### **4.2.2 Ensaio de Dureza**

A dureza, como propriedade física, é bastante utilizada para indicar e comparar os materiais. É por meio da dureza de um material que é possível identificar a sua resistência à ruptura, assim como a capacidade de deformar-se sob a ação de uma carga de tração ou compressão ou de outro esforço qualquer.

Foi realizado o ensaio de dureza Brinell HB conforme a Norma ABNT 6506-1:2019 no Laboratório de Ensaio Mecânico da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo conforme demonstrado na figura 57. Com base na norma aplicada, o penetrador utilizado foi com a esfera de diâmetro  $\varnothing$  2,5 mm e carga de 62,5 kgf adequados à carga e a esfera devido ao corpo de prova ter uma área de impressão pequena. O ensaio de dureza Brinell utilizado pelo tamanho da esfera utilizada no penetrador, quanto maior área de impressão, maior é a precisão do resultado, já que as ligas de alumínio fundidas apresentam estruturas mais heterogêneas.

**Figura 57 Durômetros utilizados na realização da dissertação do laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: O Autor, 2020

As medições realizadas na área útil dos corpos de prova foram faceadas nesta região para obter-se o paralelismo durante a aplicação da carga como demonstrado na foto da direita da figura 58.

**Figura 58 Durômetro digital e o detalhe do faceamento do corpo de prova para a realização do ensaio**



Fonte: O Autor, 2020

Após a execução do ensaio de dureza Brinell (HB), os resultados obtidos através da média simples do ensaio com 6 (seis) impressões em cada corpo de prova (6 CPs) das variações parametrizadas das velocidades da primeira e segunda fase de injeção que estão demonstrados nas tabelas 22 e 26 mencionada no capítulo Análise e Resultado

### 4.2.3 Metalografia

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material: tamanho de grão, o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões (ROHDE, 2010).

Para a análise da microestrutura, foram embutidas amostras retiradas das áreas úteis dos CPs de tração não tracionado, cortadas nos sentidos transversais de cada CP. No lixamento, foi seguida a ordem de granulometria de lixa: #200, #400 e #600. Posteriormente, executou-se o polimento em pano metalográfico com pasta de diamante na ordem de 5,0  $\mu\text{m}$  e 1,0  $\mu\text{m}$ . Tanto para o lixamento, quanto para o polimento foram utilizadas lixadeiras e politrizes metalográficas do Laboratório de Preparação da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo.

**Figura 59 Laboratório de Preparação de amostras utilizado da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: O Autor 2020

A figura 60 representa o Laboratório de Microscopia Óptica da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo utilizado para observação e documentação da microestrutura com os aumentos de 100x, 200x, 500x e 1000x, após ataque com o reagente HF (ácido fluorídrico) na concentração de 0,5% em H<sub>2</sub>O durante 15 s. Além da análise microestrutural, foi também realizada a classificação dos tamanhos de grãos, de acordo com a Norma ASTM E 112-12 pelo *software Stream Motion*. Nesta análise, utilizou-se o método planimétrico com o aumento de 100x com as amostras após serem atacadas com o reativo Keller por 2 s para revelar os contornos dos grãos.

**Figura 60 Laboratório de Microscopia Óptica da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: O Autor, 2020

#### **4.2.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

Para realizar as análises por microscopia eletrônica foram pegos os corpos de prova após o ensaio de tração, com o objetivo de visualizar a fratura. Os corpos de prova foram cortados próximo à região da fratura e fixados no porta amostras com o auxílio de uma fita condutora de Carbono. As imagens foram geradas através de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro. O feixe de elétrons gerado a partir de um filamento de tungstênio, passa por um conjunto de objetivas que direcionam o feixe na superfície da amostra, onde há a interação entre a amostra e o feixe, essa interação é coletada pelos detectores que formam as imagens.

**Figura 61 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV – do Laboratório de Nanotecnologia da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo**



Fonte: O Autor 2020

A figura 61 representa o Laboratório de Microscopia Eletrônica da Escola SENAI Nadir Dias de Figueiredo onde foram realizadas as análises de microestrutura que estão caracterizadas no capítulo Análise dos Resultados.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA

A primeira análise de resultado foi chegar se a liga de alumínio proposta no trabalho estava dentro do especificado. A tabela 19 descreve a composição química da liga proposta (A380) normalizada e o resultado da composição química da corrida do forno de espera injetada nos corpos de provas utilizada no desenvolvimento do trabalho.

**Tabela 19 Composição química da liga normalizada e o resultado da amostra do forno de espera**

<b>Elemento</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Ni</b>
<b>% Norma liga A380</b>	<b>Balanco</b>	<b>7,5-9,5</b>	<b>3,0-4,0</b>	<b>≤3,0</b>	<b>≤1,3</b>	<b>≤0,5</b>	<b>≤0,3</b>	<b>≤0,5</b>
<b>Análises</b>	84,98	8,43	3,70	0,99	0,85	0,09	0,07	0,05
	85,91	8,67	3,59	1,04	0,92	0,18	0,06	0,03
	85,87	8,34	3,58	1,03	0,91	0,21	0,02	0,11
	85,49	8,46	3,59	1,02	0,89	0,28	0,13	0,07
	84,78	8,22	3,79	1,09	0,91	0,17	0,09	0,05
	85,89	8,33	3,90	1,05	0,94	0,20	0,08	0,04
<b>% Liga Injetada</b>	<b>85,49</b>	<b>8,41</b>	<b>3,69</b>	<b>1,04</b>	<b>0,90</b>	<b>0,19</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>

Fonte: O Autor, 2020

Com os resultados apresentados das composições químicas, podemos concluir que os valores e média das amostras da liga de alumínio fundida (A 380) no forno de espera da máquina injetora está conforme o especificado.

### 5.2 RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DAS VELOCIDADES DA 1ª FASE DE INJEÇÃO

#### 5.2.1 Ensaio de Tração e Alongamento

A tabela 20 detalha os resultados das 10 (dez) amostras do ensaio de tração e os resultados das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação do limite de escoamento para as variações das velocidades de primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.

Pode-se observar conforme o gráfico 4, que o limite de resistência à tração (LRT) com a velocidade de injeção de 0,5 m/s é o maior: com 289 MPa entre as demais variações da 1ª fase. Porém, esse valor não aumenta proporcionalmente

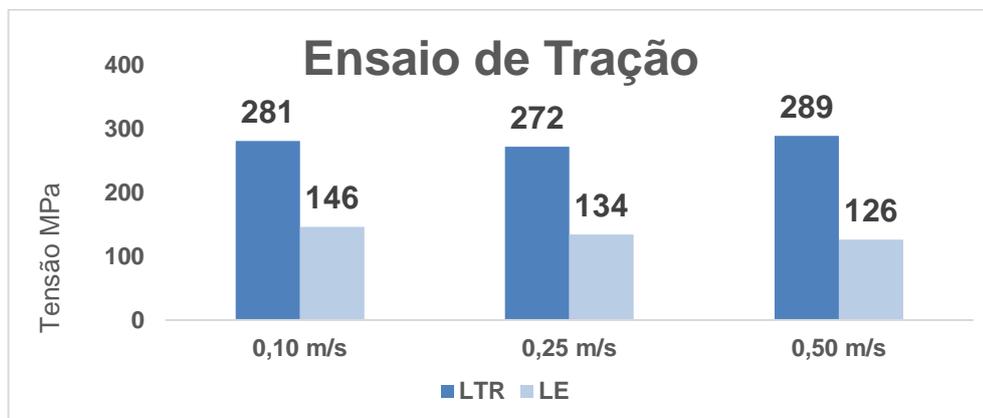
com o aumento da velocidade, pois o LRT do corpo de prova injetado com a velocidade de 0,25 m/s é de 272 MPa, menor do que o LRT obtido com a velocidade de 0,10 m/s (281 MPa). Já o limite de escoamento (LE) diminuiu proporcionalmente com o aumento da velocidade de injeção. Destaca-se que o corpo de prova injetado com velocidade de 0,1 m/s apresenta melhores propriedades mecânicas, por ter o maior LE (238 MPa) e maior ductilidade (2,7% de alongamento), como observado na tabela 21 e no gráfico 5.

**Tabela 20 Resultados do ensaio de tração e do limite de escoamento para as variações das velocidades de primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas**

<b>Resultados de limites de resistência à tração</b>											
<b>Primeira fase de injeção</b>											
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Média</b>
<b>0,10 m/s</b>	279,7	280,3	280	281,8	281,2	279,9	280,9	281,1	280,8	281,3	<b>281</b>
<b>0,25 m/s</b>	270,9	271,4	271,5	272,2	271,6	270,8	272,8	271,9	272,4	272,5	<b>272</b>
<b>0,50 m/s</b>	288,9	288,3	287,9	289,1	288,8	288,5	288,6	288,4	288,2	288,3	<b>289</b>
<b>Resultados do ensaio de limite de escoamento</b>											
<b>Primeira fase de injeção</b>											
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Média</b>
<b>0,10 m/s</b>	142,8	148,1	146,4	144,2	145,7	147,3	143,8	148,5	145,8	147,4	<b>146</b>
<b>0,25 m/s</b>	132,4	138,3	134,6	135,6	131,3	130,6	133,7	132,9	132,7	133,9	<b>134</b>
<b>0,50 m/s</b>	123,7	128,2	126,3	127,4	124,4	123,1	122,6	129,7	124,5	125,1	<b>126</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 04 Valores de LRT e de LE obtidos em ensaios de tração em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s**



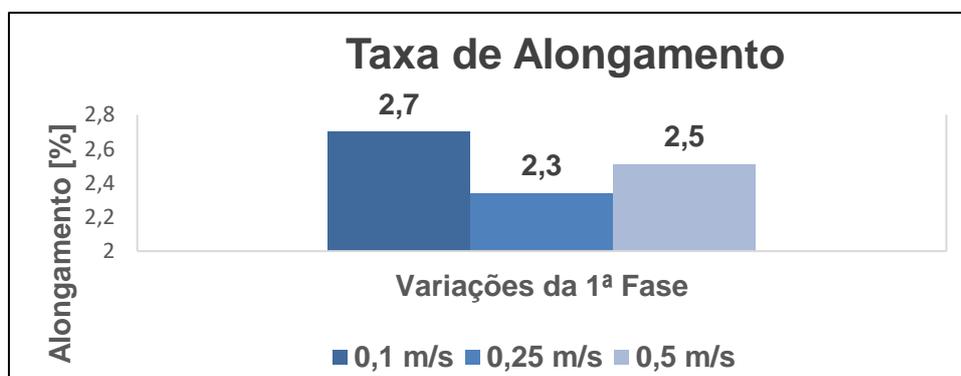
Fonte: O Autor, 2020

**Tabela 21 Resultado das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação da taxa de alongamento para as variações das velocidades de primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas**

<b>Resultados da taxa de alongamento</b>											
<b>Primeira fase de injeção</b>											
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Média</b>
<b>0,10 m/s</b>	2,4	2,3	2,9	2,6	2,3	2,5	3,1	2,8	3,2	2,9	<b>2,7%</b>
<b>0,25 m/s</b>	2,11	2,04	2,95	2,79	2,8	2,12	2	1,99	2,2	2,4	<b>2,3%</b>
<b>0,50 m/s</b>	2,5	2,7	2,63	2,43	2,34	2,61	2,46	2,52	2,46	2,45	<b>2,5%</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 05 Valores de alongamento obtidos em ensaios de tração em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s**



Fonte: O Autor, 2020

## 5.2.2 Ensaio de Dureza

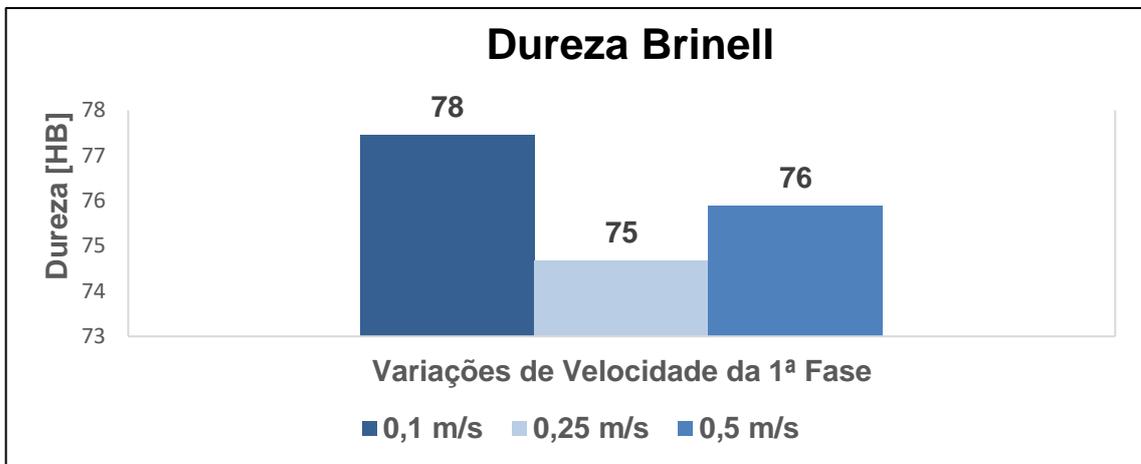
Na tabela 22 e no gráfico 6 são apresentados os valores de dureza (78 HB) da amostra de 0,1 m/s de velocidade de injeção indicando que é a maior entre as demais, mas essa diferença não é significativa dentro da margem de erro do ensaio.

**Tabela 22 Resultados das 6 (seis) amostras do ensaio dureza Brinell HB para as variações das velocidades primeira fase de injeção com suas respectivas médias apuradas**

<b>Resultados do ensaio de dureza Brinell HB</b>							
<b>Primeira fase de injeção</b>							
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Média</b>
<b>0,10 m/s</b>	77,43	76,53	76,89	77,89	78,18	77,78	<b>78HB</b>
<b>0,25 m/s</b>	74,98	74,31	74,57	73,96	75,24	74,96	<b>75HB</b>
<b>0,50 m/s</b>	75,34	75,75	76,78	74,89	75,73	76,85	<b>76HB</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 06** Valores de dureza Brinell em função das velocidades da primeira fase de injeção especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s

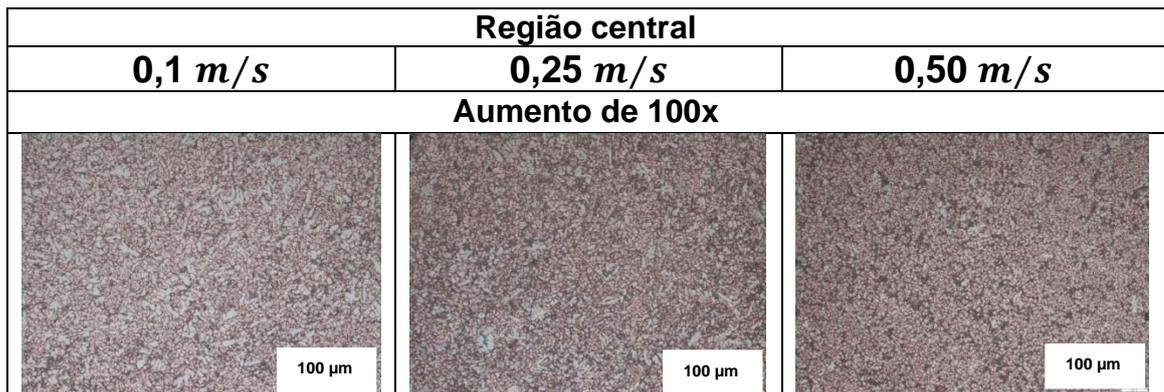


Fonte: O Autor, 2020

### 5.2.3 Classificação do tamanho de grão

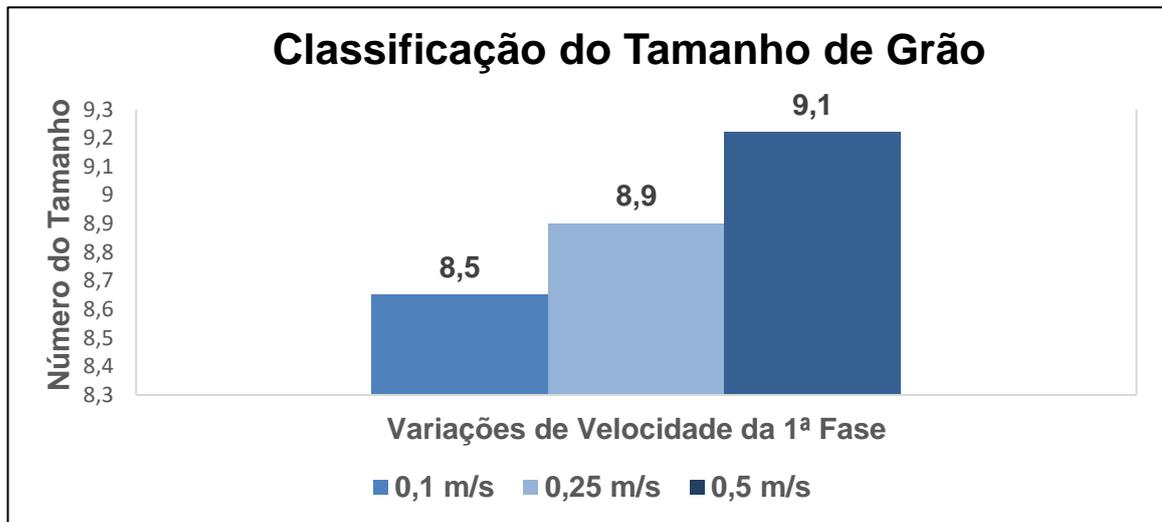
Na figura 62 são mostradas micrografias da liga de alumínio SAE 380 em injetadas em várias velocidades. A análise dessas micrografias permitiu determinar os tamanhos de grão, como apresentado no gráfico 7. Pode-se observar que houve a diminuição do TG com o aumento da velocidade da 1ª fase.

Figura 62 Micrografias de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 atacadas com o reativo Keller para a classificação do TG via Software “Stream Motion” e método planimétrico nas velocidades especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s da 1ª fase de injeção



Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 07 Classificação do tamanho de grão (TG) de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 injetados nas velocidades especificadas de 0,1 m/s, 0,25 m/s e 0,5 m/s da 1ª fase de injeção**



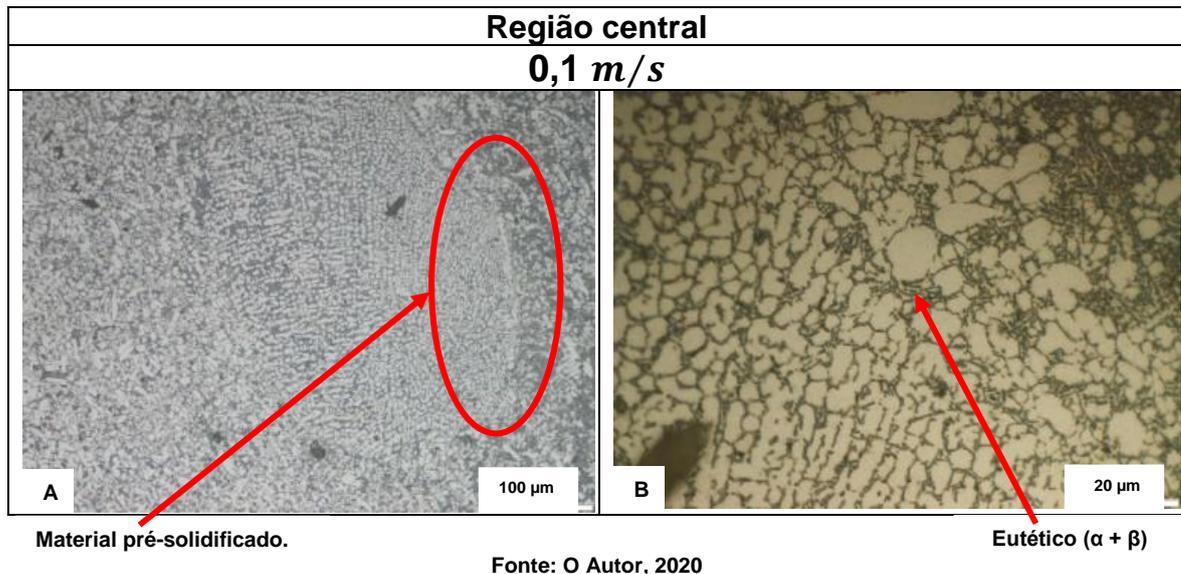
Fonte: O Autor, 2020

#### 5.2.4 Micrografia e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Na figura 63 são mostradas micrografias dos parâmetros de regulagem das velocidades de 0,1 m/s na primeira fase de injeção, velocidade de 1,8 m/s na segunda fase de injeção e da pressão de 132 bar de multiplicador na terceira fase de injeção. A amostra obtida com velocidade de injeção de 0,1 m/s apresenta microestrutura típica da liga Al-Si hipoeutética. Nota-se a presença da fase  $\alpha$ , do eutético ( $\alpha + \beta$ ) e de todo o conjunto de precipitados figura 64B. O eutético encontra-se refinado devido ao resfriamento rápido.

Na figura 63A observa-se uma grande variação de tamanhos de grãos em decorrência da baixa velocidade de injeção na primeira fase. Em função desta pré-solidificação, ocorreram as contrações líquidas e de solidificação em parte do material ainda na câmara, o que contribuiu para uma menor fração de porosidades no fundido. Na figura 63A nota-se indicado em detalhe o material pré-solidificado na câmara de injeção devido à baixa velocidade da 1ª fase.

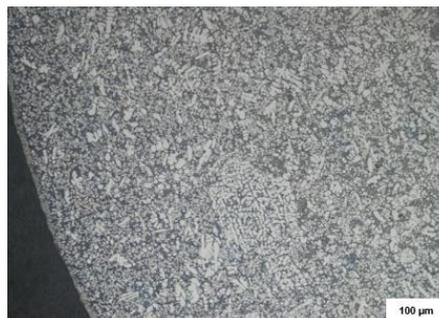
**Figura 63** Micrografias da amostra com a velocidade de 0,1 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%



Na figura 64 é mostrada o refinamento maior, por ter maior troca de calor com as paredes do molde metálico, não permitindo seu crescimento apesar de ainda apresentar algumas pequenas ramificações.

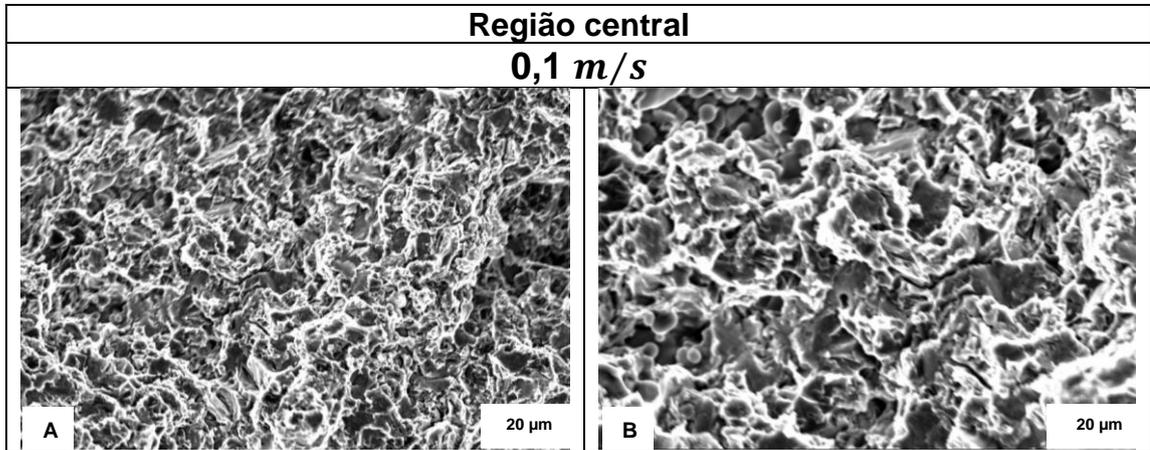
Essa amostra apresentou maior LE (238 MPa), maior dureza (78 HB) e maior taxa de alongamento (2,7%) em comparação com as de velocidades de injeção da 1ª fase de 0,25 e 0,5 m/s. O que explicaria essas melhores propriedades mecânicas neste teste poderia ser que: parte do material foi injetado na condição de velocidade de injeção baixa, formando algumas partículas de alfa com aspecto mais arredondado circundados pelo eutético na região central da amostra. Esse arredondamento se deve ao atrito sofrido pela partícula quando de sua condução para a cavidade. Possui maior tamanho de grão por ter sofrido maior tempo de troca de calor com o molde.

**Figura 64** Microestrutura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,1 m/s que apresentou os melhores resultados de propriedades mecânicas. Ataque com HF (0,5%) - Região da borda



Fonte: O Autor, 2020

Figura 65 Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,1 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX

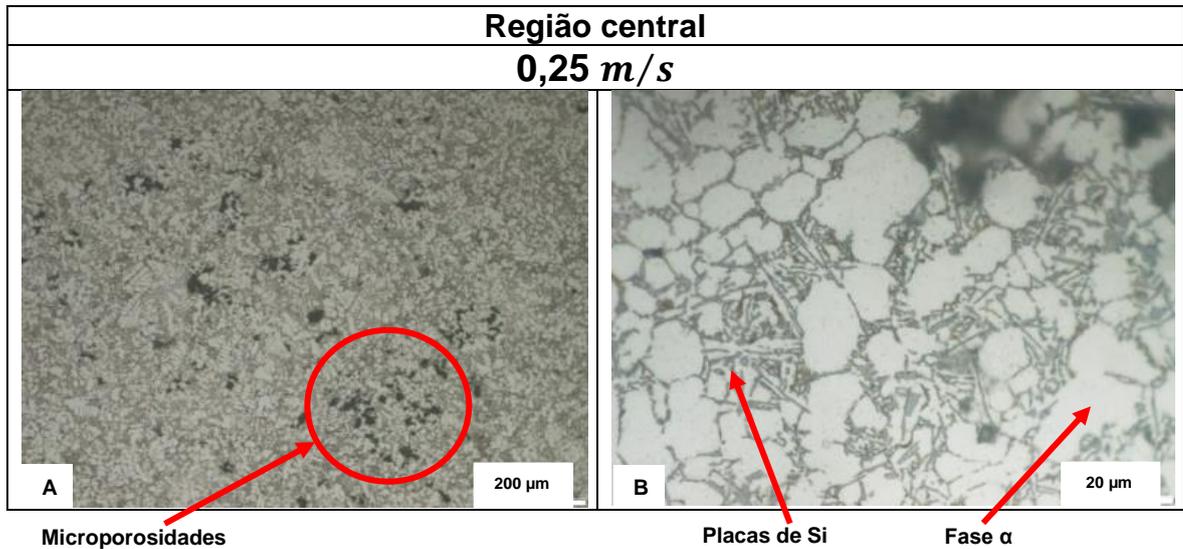


Fonte: O Autor, 2021

Para o parâmetro de regulação de injeção com as velocidades de 0,25 m/s na primeira fase de injeção, velocidade de 1,8 m/s na segunda fase de injeção e a pressão de 132 bar de multiplicador na terceira fase de injeção. Na figura 66 são mostradas micrografias em comparação com a amostra da velocidade de injeção de 0,1 m/s; é o tamanho das dendritas, pois elas começam a diminuir. A fase  $\alpha$  aparenta maior homogeneidade em comparação com a amostra da velocidade de injeção de 0,1 m/s, com um refino maior do eutético, mais disperso na estrutura.

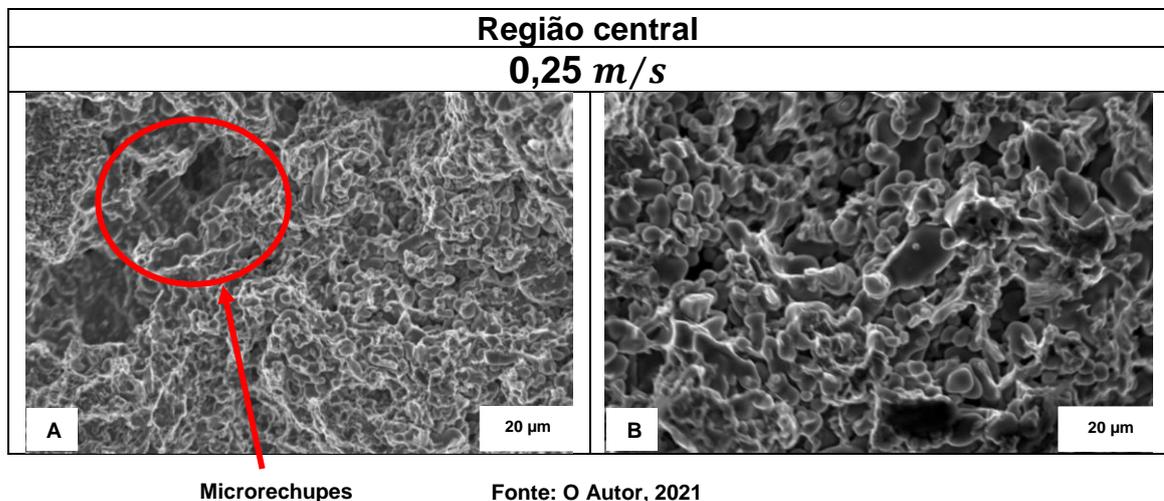
Essa amostra apresenta TG menor em relação à velocidade de 0,1 m/s. Porém, observa-se uma maior presença de microporosidades e microrechupes, como evidenciado nas figuras 66A e 67A. Na figura 66B observa-se em detalhe a presença de placas de Si do eutético e grãos da fase  $\alpha$ . A presença de microporosidades e microrechupes é prejudicial para o limite de escoamento (134 MPa), para a dureza (75 HB) e para o alongamento (2,3%).

Figura 66 Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%



Fonte: O Autor, 2020

Figura 67 Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,25 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX

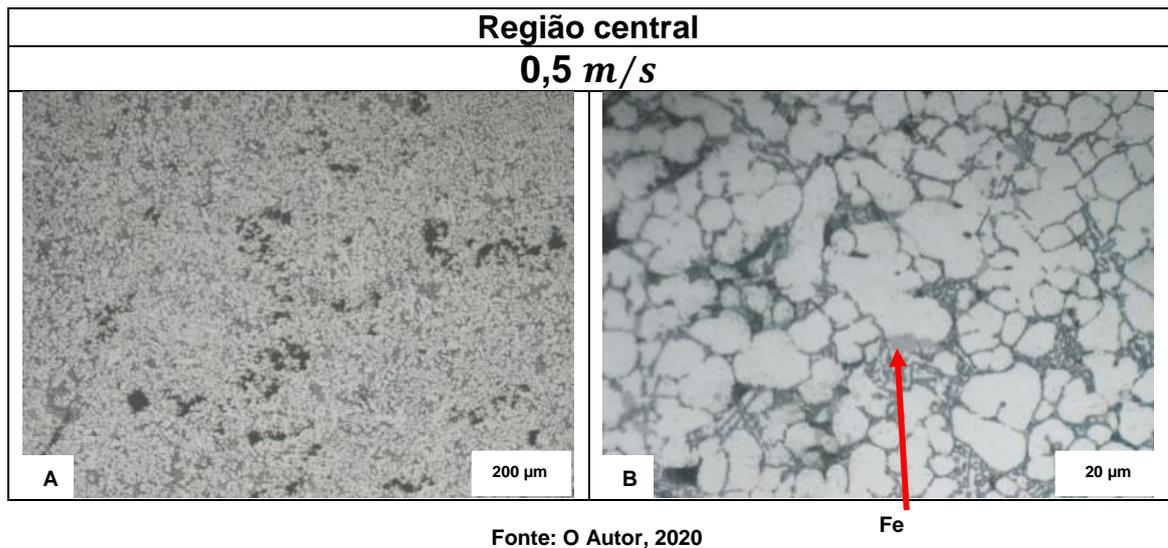


Fonte: O Autor, 2021

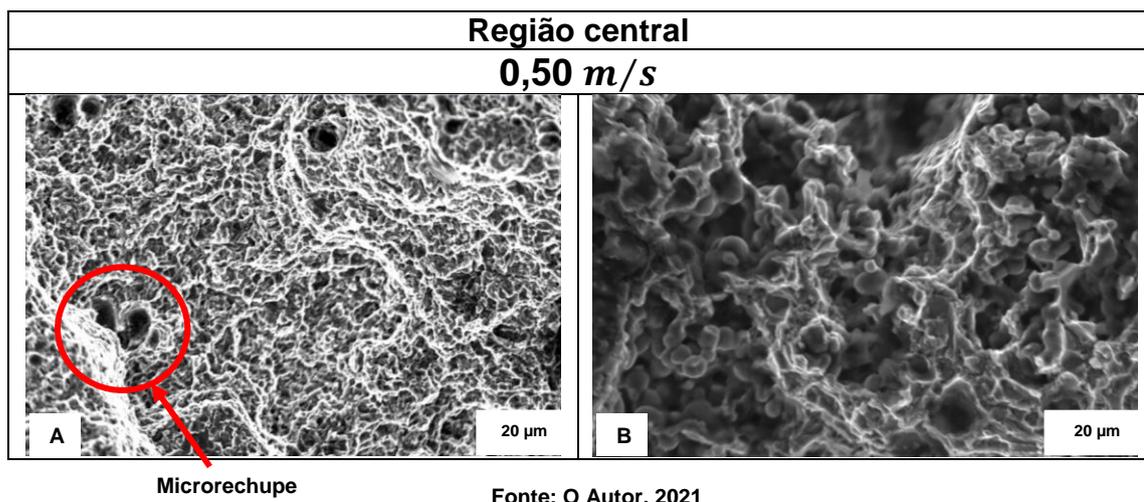
Na regulagem dos parâmetros de injeção das velocidades de 0,5 m/s na primeira fase de injeção, velocidade de 1,8 m/s na segunda fase de injeção; e a pressão de 132 bar de multiplicador na terceira fase de injeção demonstra na microestrutura, figura 63, que possui menor tamanho de grão entre as três condições decorrentes da rápida troca de calor com o molde. Também são observados microrechupes, como demonstrado nas figuras 74A e 75A. Em função desses aspectos observados, o LRT foi o maior, apresentando um valor de 289 MPa. Porém, nessa velocidade de injeção ocorre a maior presença de

microporosidades e microrechupes, inclusive interconectadas. Isto ocorreu devido à maior turbulência em comparação com as outras duas condições da 1ª fase de injeção, causando um menor LE (126 MPa). Também são observadas na figura 74B algumas partículas relativamente grosseiras e partes com formação de placas de intermetálico com a presença de ferro.

**Figura 68** Micrografias da amostra com a velocidade de 0,5 m/s na 1ª fase e de 1,8 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%



**Figura 69** Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 1ª fase de 0,50 m/s e 1.8 m/s da 2ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX



Nas variações de velocidade da primeira fase, detectou-se que as amostras com 0,10 m/s de velocidade apresentaram o maior LE (238 MPa), maior alongamento (2,7 %) e maior dureza (78 HB), em comparação com as amostras

injetadas com as outras velocidades (0,25 m/s e 0,50 m/s). Estes valores se explicam pelo fato de parte do material injetado ter chegado na cavidade do molde com menor turbulência do metal líquido, devido à baixa velocidade de injeção. Este fator contribuiu para um menor índice de porosidades nos corpos de prova, como demonstrado na figura 65 da microscopia eletrônica de varredura.

Um dos fatores que contribuiu para a formação dos poros foi a pequena taxa de ocupação da câmara de injeção, que foi de cerca de 30 %. Isto ocorreu devido à pouca quantidade de metal do conjunto fundido, que é função principalmente do projeto do ferramental. O pouco enchimento da câmara de injeção também resulta em maiores quantidades de metal com baixa temperatura entrando na matriz. Este material com baixa temperatura pode causar bloqueios que influenciaram na transmissão da pressão de injeção e geraram áreas com estruturas anômalas, ocorrendo o aumento da fragilidade da peça, segundo observado também por (BIRCH, 2000) e outros. Segundo (Fuoco, 2020), a taxa de ocupação deve estar entre 40 e 60 %.

As amostras com 0,25 m/s de velocidade apresentaram os valores mais baixos de LRT (272 MPa), de LE (134 MPa) e de dureza (75 HB) comparado com as amostras obtidas com as outras velocidades de injeção (0,10 m/s e 0,50 m/s). Isto ocorreu devido ao injetado com a velocidade de 0,25 m/s ter apresentado um nível de porosidades elevado evidenciado na figura 68 da microscopia eletrônica de varredura, levando os valores de LRT e LE a ficarem muito abaixo do obtido nas outras velocidades de injeção. Com a velocidade de 0,50 m/s obteve-se o maior LRT (289 MPa) em função do menor tamanho de grão, conforme foi observado nos gráficos 04 e 07. O seu baixo LE se deve a elevada velocidade de injeção utilizada, causando uma turbulência elevada do metal na câmara de injeção. Também é importante observar que com a velocidade de 1ª fase de injeção de 0,1 m/s o material apresentou descontinuidades por temperatura baixa do metal devido à baixa velocidade de injeção. Para a velocidade de injeção de 0,5 m/s, o material apresentou porosidades por consequência da alta velocidade, devido à geração de turbulência no metal líquido dentro da câmara de injeção.

## 5.3 RESULTADOS DAS VARIAÇÕES DAS VELOCIDADES DA 2ª FASE DE INJEÇÃO

### 5.3.1 Ensaios de tração e alongamento

A tabela 23 detalha os resultados das 10 (dez) amostras do ensaio de tração e os resultados das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação do limite de escoamento para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas.

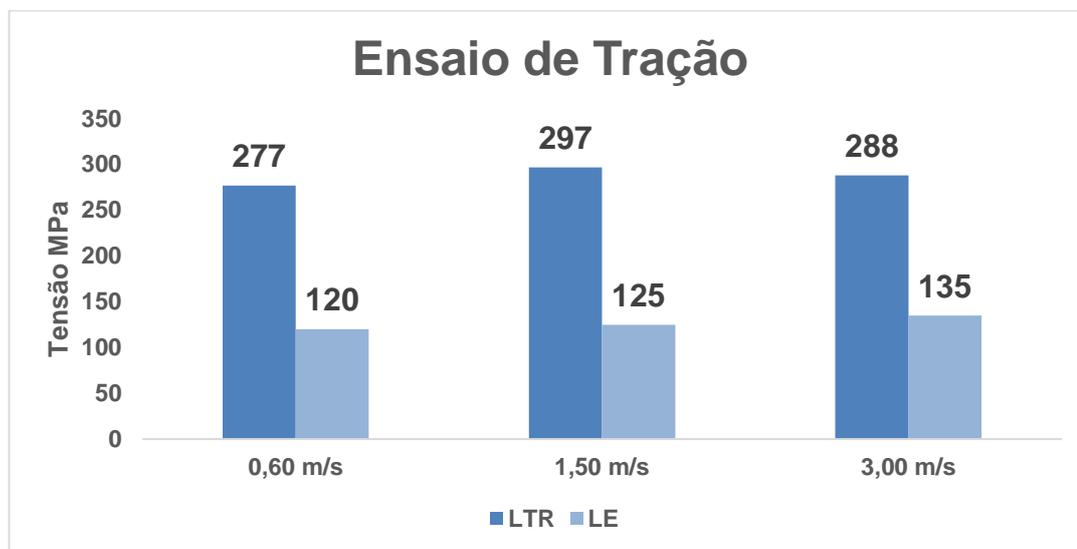
Nos gráficos 8 e 9 são apresentados os gráficos com os resultados do LE e do LRT, e do alongamento, respectivamente, para as diversas velocidades de injeção da segunda fase. Nota-se neste gráfico que o valor do LRT (297 MPa) da amostra obtida com velocidade de injeção da segunda fase de 1,5 m/s é o maior em comparação com as outras duas velocidades (0,6 m/s e 3 m/s). Já nos corpos de prova injetados na velocidade de 0,6 m/s o LRT (277 MPa), o LE (120 MPa) e o alongamento (1,5%) foram menores.

**Tabela 23 Resultados do ensaio de tração e do limite de escoamento para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas**

<b>Resultados do ensaio de resistência à tração</b>											
<b>Segunda fase de injeção</b>											
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Média</b>
<b>0,60 m/s</b>	276,8	276,9	275,4	279,8	277,9	279,6	274,8	275,2	276,8	276,8	<b>277</b>
<b>1,50 m/s</b>	297,4	297,2	297,7	297,7	297,6	297,1	297,8	298	297,6	296,9	<b>297</b>
<b>3,00 m/s</b>	288	288,3	288,1	288,5	287,8	288,4	287,6	288,2	288	288,1	<b>288</b>
<b>Resultados do ensaio de limite de escoamento</b>											
<b>Segunda fase de injeção</b>											
<b>Velocidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Média</b>
<b>0,60 m/s</b>	119,1	121,2	118,3	119,8	123,4	120,9	121,8	117,9	119,7	118,9	<b>120</b>
<b>1,50 m/s</b>	122,1	125,3	124,3	123,1	125,1	127,2	129,3	122,7	123,8	127,1	<b>125</b>
<b>3,00 m/s</b>	132,8	137,8	134,7	136,5	133,8	138,2	133,2	134,9	132,9	135,2	<b>135</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 8 Valores de LTR e de LE em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s)**



Fonte: O Autor, 2020

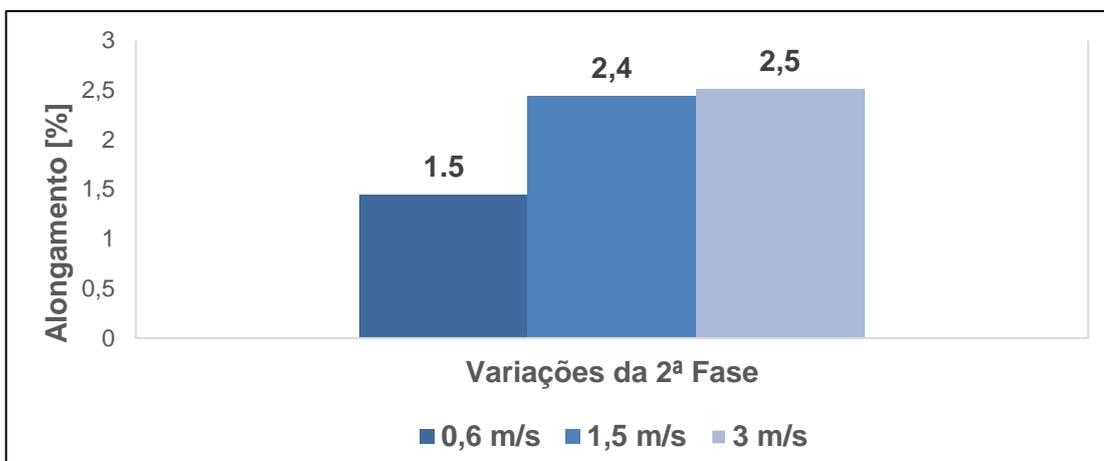
A condição que apresenta as melhores propriedades mecânicas é a de velocidade de injeção da segunda fase de 3 m/s. Nesta condição, o material apresentou os maiores valores de LE (246 MPa) e de alongamento (2,5%), conforme gráficos 8 e 9.

**Tabela 24 Resultado das 10 (dez) amostras do ensaio de tração para determinação da taxa de alongamento para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas**

Resultados da taxa de alongamento											
Segunda fase de injeção											
Velocidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
<b>0,60 m/s</b>	1,38	1,42	1,56	1,82	1,27	1,32	1,41	1,38	1,43	1,41	<b>1,5%</b>
<b>1,50 m/s</b>	2,39	2,41	2,38	2,46	2,47	2,63	2,56	2,23	2,29	2,58	<b>2,4%</b>
<b>3,00 m/s</b>	2,49	2,57	2,54	2,73	2,21	2,45	2,67	2,45	2,53	2,46	<b>2,5%</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 09 Valores de alongamento em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s)**



Fonte: O Autor, 2020

### 5.3.2 Ensaio de dureza

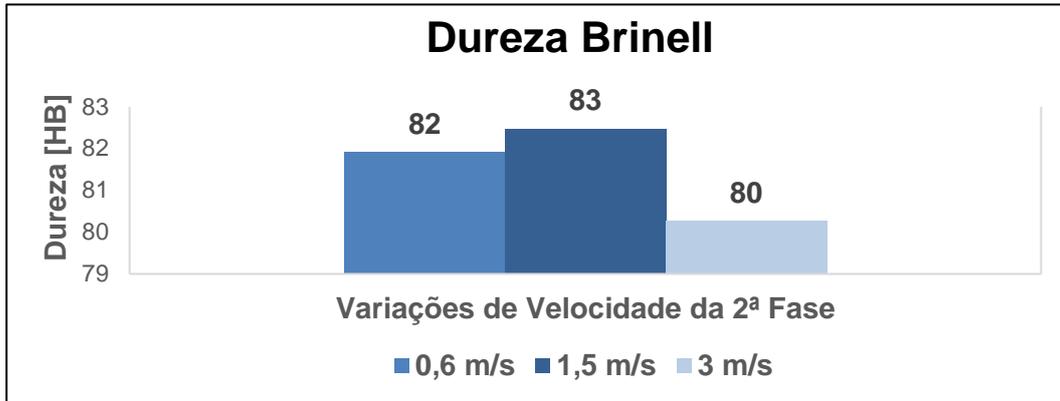
Os valores de dureza das amostras em função das velocidades de injeção da segunda fase estão apresentados tabela 25 e no gráfico 10, mostrando nenhuma variação significativa.

Tabela 25 Resultados das 6 (seis) amostras do ensaio dureza Brinell HB para as variações das velocidades de segunda fase de injeção com suas respectivas médias apuradas

Resultados do ensaio de dureza Brinell HB							
Segunda fase de injeção							
Velocidades	1	2	3	4	5	6	Média
<b>0,60 m/s</b>	80,98	81,56	82,67	82,54	81,63	82,14	<b>82HB</b>
<b>1,50 m/s</b>	81,38	82,57	82,97	81,59	83,28	83,09	<b>83HB</b>
<b>3,00 m/s</b>	79,36	80,34	81,19	81,53	79,24	80,02	<b>80HB</b>

Fonte: O Autor, 2020

**Gráfico 10** Valores de dureza Brinell em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s)



Fonte: O Autor, 2020

### 5.3.3 Classificação do tamanho de grão

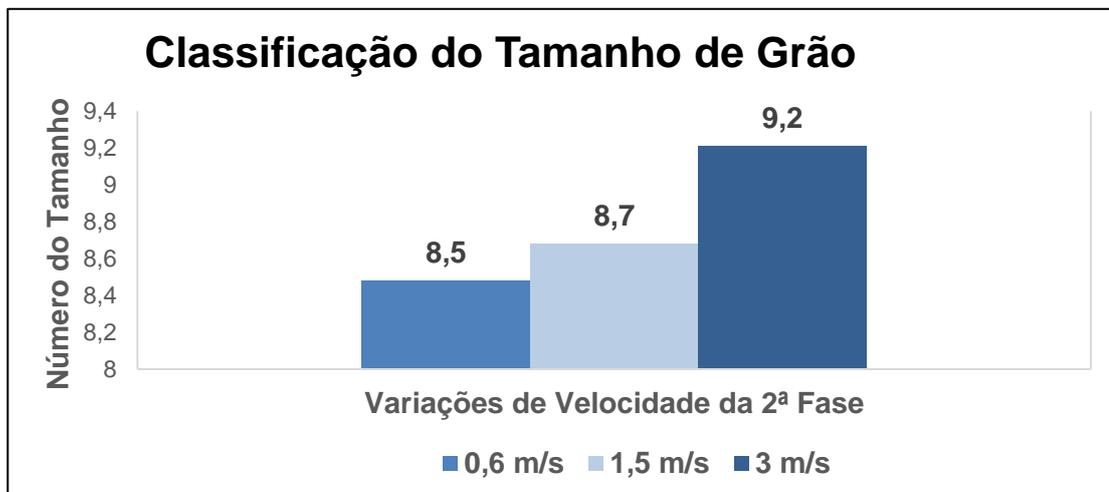
Na figura 70 são mostradas micrografias que houve a diminuição do TG com o aumento da velocidade da 2ª fase de injeção. Essa diminuição do número do tamanho de grão é mostrada no gráfico 11.

Figura 70 Micrografias de corpos de prova da liga de alumínio SAE 380 atacadas com o reativo Keller para a classificação do TG via Software “Stream Motion” e método planimétrico nas velocidades de 0,6 m/s, 1,5 m/s e 3,0 m/s da 2ª fase de injeção



Fonte: O Autor, 2020

Gráfico 11 Classificação do TG obtido via Software “Stream Motion” e método planimétrico em função das velocidades da 2ª fase de injeção (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s)



Fonte: O Autor, 2020

#### 5.3.4 Micrografia e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A estrutura representada na figura 71 com parâmetros de regulagem de injeção das velocidades de 0,6 m/s na segunda fase de injeção, velocidade de 0,25 m/s na primeira fase de injeção e a pressão de 132 bar de multiplicador na terceira fase de injeção apresentada na figura 71 a microestrutura heterogênea, com partes refinadas e outras mais grosseiras, com variação de tamanho das dendritas. Além disto, observou-se vários graus de refino da fase  $\alpha$  e níveis de dispersão do eutético. Notou-se também nestas micrografias da figura 71A, a formação de uma película de alumina separando o metal solidificado na câmara de injeção em relação com o que solidificou na cavidade. Pode-se notar, conforme figura 71B, uma junta fria causada por esse encontro de fluxos de metal líquido que não se fundem completamente. A película formada prejudicou o LE da amostra, que ficou em 120 MPa, o menor valor em comparação com as três velocidades da 2ª fase. Essas lâminas de óxidos atuam como um lugar preferencial para início de trincas. Nesse caso, devido à velocidade da segunda fase de injeção, por ser muito baixa (0,6 m/s), acabou agravando esse problema.

Figura 71 Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 0,6 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%

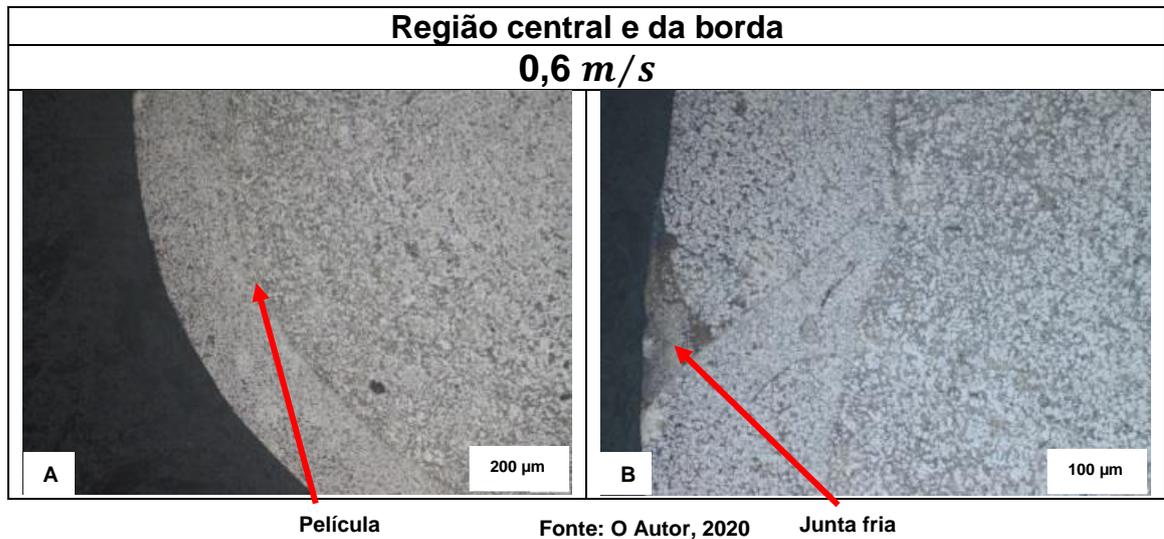
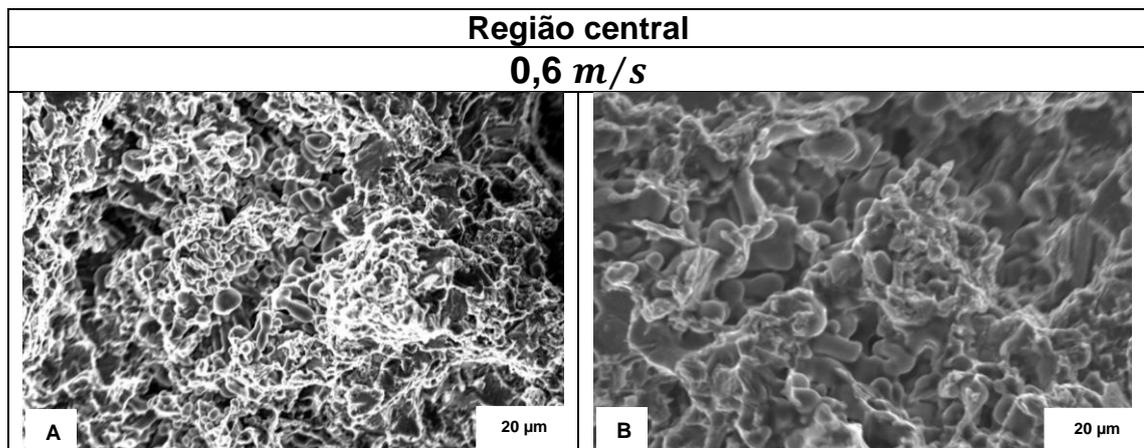


Figura 72 Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 0,6 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX

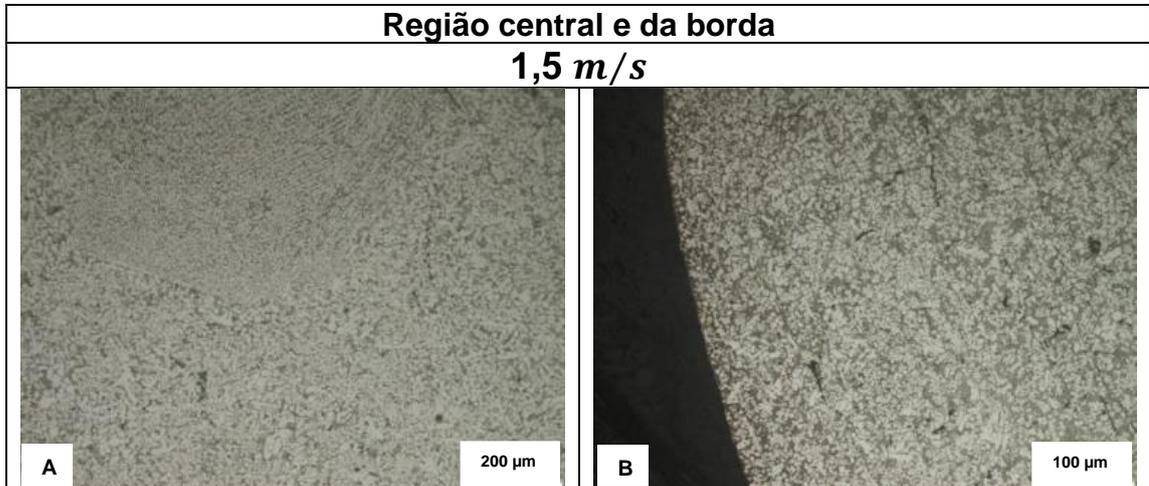


Fonte: O Autor, 2021

Como observado na figura 73, para os parâmetros de regulação de injeção, com as velocidades de 1,5 m/s, na segunda fase de injeção, velocidade de 0,25 m/s, na primeira fase e a pressão de 132 bar de multiplicador, na terceira fase de injeção, são mostradas micrografias de que também existe indício de material pré-solidificado na câmara de injeção, evidenciado na micrografia mostrada na região do núcleo, figura 79B, mas sem a formação da película de óxido. Se essa se formou, foi removida por atrito durante o preenchimento mais rápido da cavidade. O valor do LE de 125 MPa foi diminuído, muito provavelmente, pela presença de descontinuidades presentes, que não puderam ser caracterizadas. O tamanho

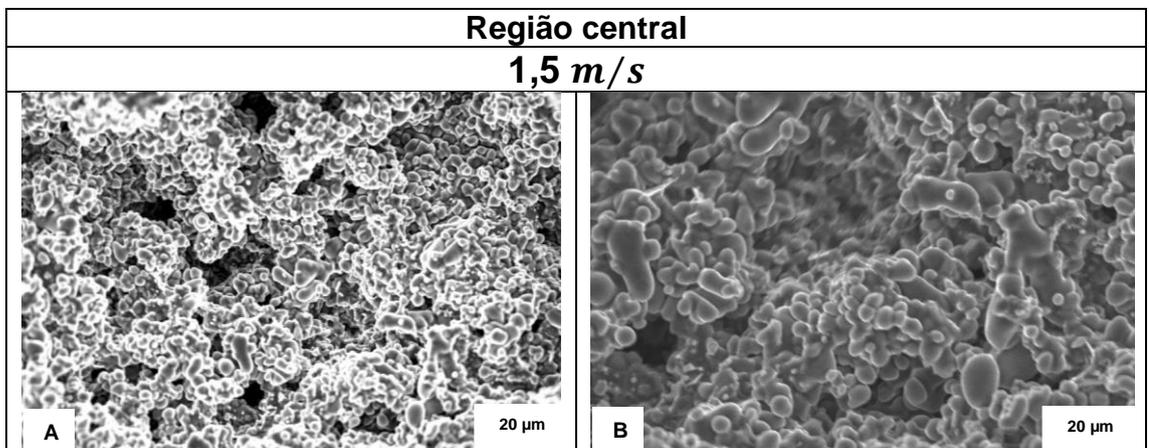
médio dos grãos do material, nesta condição, foi ligeiramente menor do que a amostra obtida com velocidade de injeção da segunda fase de 0,6 m/s.

**Figura 73** Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 1,5 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%



Fonte: O Autor, 2020

**Figura 74** Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 1,5 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX

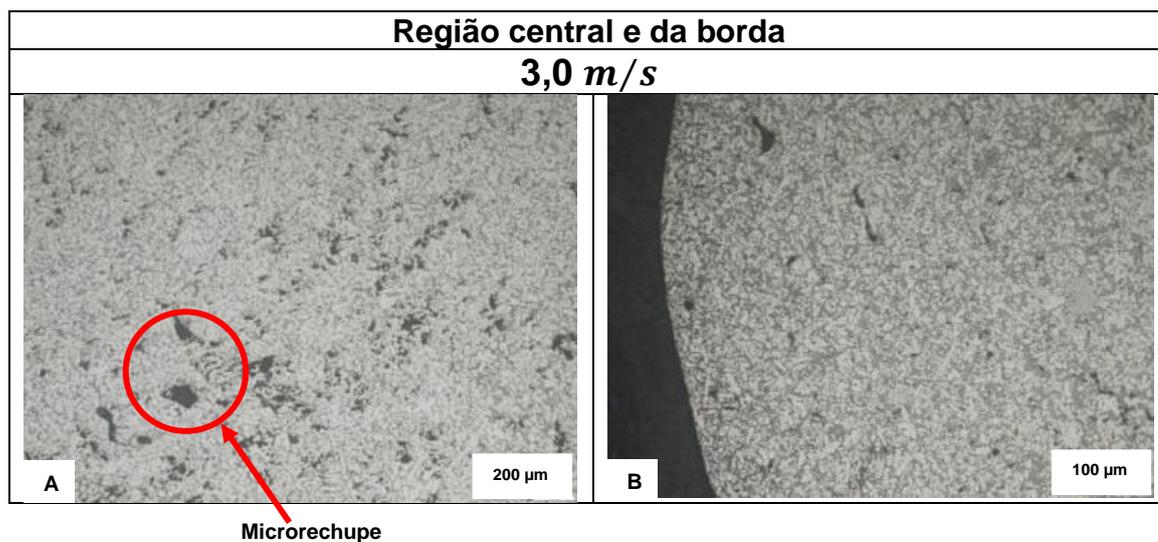


Fonte: O Autor, 2021

O preenchimento da cavidade foi mais rápido com os parâmetros de regulagem de injeção, com as velocidades de 3,0 m/s, na segunda fase de injeção, velocidade de 0,25 m/s, na primeira fase de injeção, e a pressão de 132 bar de multiplicador, na terceira fase de injeção, São demonstradas, nas figuras 75A e 76A, micrografias indicando a grande presença de microrechupes. O preenchimento da cavidade nesta velocidade maior de injeção, da segunda fase, provocou uma maior turbulência do metal na cavidade e, conseqüentemente, maior

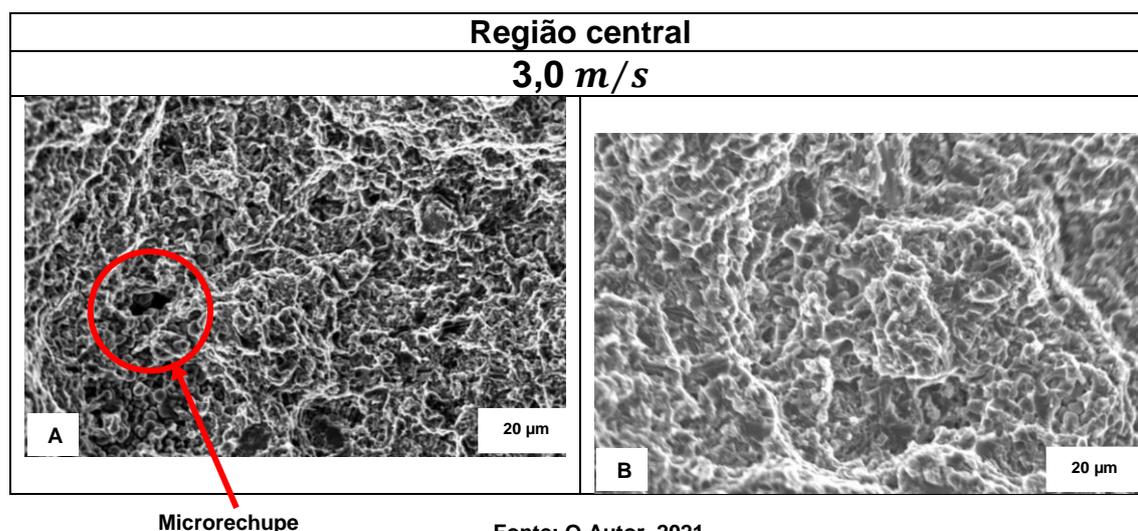
aprissonamento de ar, contribuindo para obtenção de maior nível de microporosidades. Mesmo assim, em função do menor tamanho de grão e maior dispersão dos vazios, as propriedades mecânicas foram superiores entre as três velocidades de segunda fase empregadas, com LE de 246 MPa e alongamento de 2,5%.

**Figura 75** Micrografias da amostra com a velocidade de 0,25 m/s na 1ª fase e de 3,0 m/s na 2ª fase de injeção Ataque com HF 0,5%



Fonte: O Autor, 2020

**Figura 76** Apresenta a estrutura da fratura da amostra com velocidade de injeção da 2ª fase de 3,0 m/s e 0,25 m/s da 1ª fase parametrizada e padronizada realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A figura A está com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 750X. A figura B com EHT 20.00Kw, Signal A= InLeans, WD = 5,2mm e Mag 1,5 KX



Fonte: O Autor, 2021

Nas variações das velocidades da 2ª fase de injeção, verificou-se que as amostras com velocidade de 0,6 m/s tiveram os piores valores de LRT (277 MPa)

em relação as outras velocidades da 2ª fase de injeção. Nesta condição, o LE (120 MPa) e o Alongamento (1,5%) também apresentaram valores mais baixos em consequência da baixa velocidade de injeção. Pontos com juntas frias foram formados, fragilizando as amostras nesta velocidade de injeção. As amostras com a velocidade de injeção da 2ª fase: de 1,5 m/s, mostraram melhores resultados de ensaios mecânicos. Observa-se, nesta condição, os maiores valores de LRT (297 MPa) e de dureza (83 HB). Estes valores se explicam pela menor quantidade de defeitos em relação às amostras com velocidades de injeção da 2ª fase de 0,6 m/s e 3,0 m/s.

Com a velocidade de injeção da 2ª fase de 3,0 m/s foram obtidos os maiores valores de LE (246 MPa) e de alongamento (2,5%), devido ao menor tamanho de grão. Pelo fato da alta velocidade utilizada nesta condição, o nível de porosidades foi maior em relação às outras duas velocidades. Com relação às descontinuidades, a velocidade de 0,6 m/s da 2ª fase de injeção mostrou descontinuidades por junta fria. Porém, com a velocidade de 3,0 m/s da 2ª fase de injeção houve a geração de turbulência do metal na cavidade do molde, aumentando o nível de porosidade nos corpos de prova.

Com os resultados dos limites de resistência para as velocidades de 0,1m/s (281 MPa), 0,25m/s (272 Mpa) e 0,5m/s (289 Mpa) para a primeira fase de injeção e 0,6m/s (277 MPa), 1,5m/s (297 Mpa) e 3m/s (288 Mpa) para a segunda fase de injeção. Segundo (FUOCO, 2017), o processo de fundição sob pressão às resistências mecânicas é elevado; entre 200 e 300 Mpa, podendo-se concluir que no quesito resistência mecânica, as velocidades tanto de primeira quanto de segunda fase de injeção não alteram a propriedade mecânica dos produtos fundidos.

No quesito alongamento, as velocidades geraram os seguintes resultados: para 0,1m/s (2,7%), 0,25m/s (2,3%) e 0,5m/s (2,5%), para a primeira fase de injeção e 0,6m/s (1,5%), 1,5m/s (2,4%) e 3m/s (2,5%), para a segunda fase de injeção. Com exceção à velocidade de 0,6m/s (1,5%), os restantes das variações das velocidades apresentaram valores acima de 2%, concluindo-se como ótimo para o processo de fundição sob pressão

Vale a pena salientar que não somente as velocidades de injeção são importantes de se parametrizar e controlar, mas também, a temperatura do metal

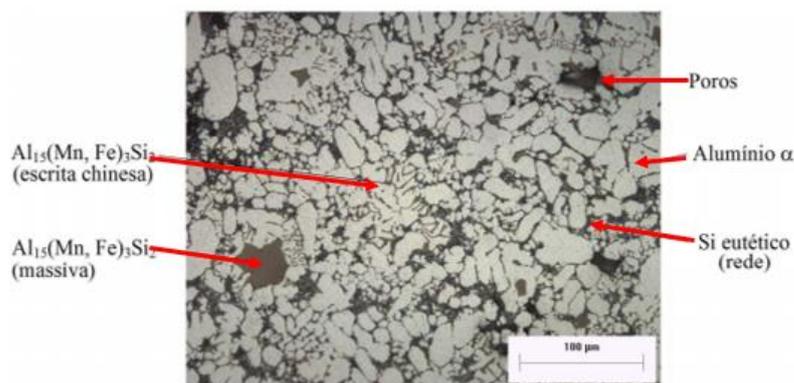
fundido e molde de injeção, o grau de enchimento da bucha de injeção, um bom projeto do molde e de canais de alimentação, a diluição do desmoldante e entre outras variáveis. Esses fatores impactam diretamente na sanidade do produto fundido sob pressão, baixando as suas propriedades mecânicas, ficando como sugestão novos estudos e projetos de pesquisa visando apoiar as indústrias na melhoria da qualidade do produto fundido.

Esta dissertação teve como o objetivo compreender melhor o fenômeno de formação de defeitos nas peças fundidas sob pressão e suas consequências, buscando na literatura estudos relacionados ao assunto, sendo citados alguns autores a seguir:

(AMMAR, SAMUEL e SAMUEL, 2008) estudaram o comportamento de cinco ligas de Al-Si sob a influência de heterogeneidades microestruturais e submetidas a testes de fadiga. Após a análise das fraturas, concluíram que o defeito de porosidade foi o principal responsável pela diminuição da vida das peças nos testes de fadiga, sendo que 90% das amostras tiveram fraturas originadas deste defeito.

Segundo (APELIAN e MAKHLOUF, 2004), em fundição sob pressão, é comum a formação de partículas massivas na forma de poliedros, estrelas e blocos, junto com a escrita chinesa. Isto parece ser contraditório, porque este processo impõe resfriamento rápido aos componentes fundidos e desta maneira os compostos massivos não deveriam ser formados. Entretanto, segundo estes pesquisadores, a transferência do metal do forno com uma concha até a câmara de injeção e a permanência na câmara de injeção, mesmo por um curto período, causam um resfriamento lento, que favorece a formação dos intermetálicos na forma massiva.

**Figura 77** Amostra de 0,1 m/s atacada com HF (0,5%) - Aumento de 100x, com a escrita chinesa, poros, a alumínio em fase alfa e o Si em rede eutética



Fonte: Ibere Duarte, 2007

(WANG, TURLEY e SAVAGE, 2011) apresentaram um estudo onde os níveis de porosidade resultantes de gás de várias peças fundidas sob pressão foram quantificados utilizando o método de fusão a vácuo. O estudo revelou que a maior parte da porosidade de gás é resultante de aprisionamento de gases durante o preenchimento da cavidade.

(FAURA, LÓPEZ e HERNÁNDEZ, 2001) analisaram a aceleração do pistão durante a primeira fase de injeção do processo de fundição sob pressão, buscando minimizar o aprisionamento de ar, e conseqüentemente, reduzir a porosidade das peças produzidas.

(DARGUSH, 2006) investigou a influência da pressão durante a solidificação no processo de fundição sob pressão. Segundo os autores, a porosidade diminui com o aumento da pressão e aumenta com o aumento da velocidade de injeção.

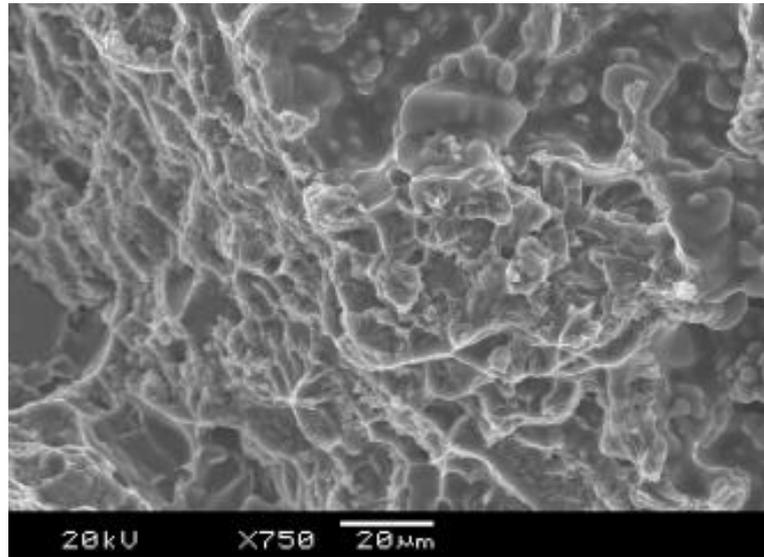
Segundo (FUOCO, 2020), o processo de fundição sob pressão tem como característica a alta velocidade de injeção, ocasionando muitas bolas de ar preso no produto. Outra característica apontada é a alta reatividade da liga de alumínio com o oxigênio, gerando muita inclusão de óxidos nas peças injetadas.

(FUOCO, 2020), menciona também que a liga A380 mais comum utilizada no processo de fundição sob pressão tem a sua solidificação de forma pastosa, na qual permite a alimentação, se houver, a solidificação direcional através do projeto de canais e do sistema de compactação na terceira fase de injeção.

Portanto, o processo de fundição sob pressão tem como característica, apesar de toda tecnologia embarcada e desenvolvimento, produtos apresentam baixa sanidade interna com norma de referência para aprovação dos limites aceitáveis.

Segundo (BONOLLO F, 2015), a influência dos defeitos de fundição nas propriedades mecânicas das ligas de alumínio pode tornar o comportamento de tração de ligas de fundição imprevisível, como exemplifica a figura 67, onde as superfícies das fraturas na região de ruptura após o ensaio de tração dos corpos de prova obtidos percebem-se ainda a presença de poros. Também segundo (AMMAR, SAMUEL e SAMUEL, 2008), quanto à análise das fraturas, concluíram que o defeito de porosidade é o principal responsável pela diminuição da vida das peças nos testes de fadiga.

**Figura 78** Aspecto da superfície de fratura do corpo de prova de tração no estado bruto de fundição



Fonte: Ibero Duarte, 2007

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se a influência da velocidade de injeção nas propriedades mecânicas da liga A380.0, utilizando corpos de prova para ensaio de tração produzidos através do processo de fundição sob pressão em câmara fria. Para verificar esta influência, foram aplicadas 3 variações de velocidades diferentes na 1ª fase (0,10 m/s, 0,25 m/s e 0,50 m/s) e da mesma forma para a na 2ª fase (0,6 m/s, 1,5 m/s e 3,0 m/s), o que permite concluir que:

Com a baixa velocidade da primeira fase de 0.1m/s, os problemas de fundição são menores, aumentando muito o limite de escoamento do corpo de prova; e que para a maior velocidade de segunda fase para a compactação do metal sobre a cavidade do molde de 3m/s, aumentou consideravelmente o maior limite de escoamento o produto fundido.

A segunda fase de injeção, demonstrou que o tamanho grão ocasionado pela alta velocidade de resfriamento do metal líquido no molde compactua diretamente no limite de resistência dos produtos fundidos sob pressão, chegando 297 Mpa na velocidade 1,5m/s, na segunda fase de injeção.

Quanto menor a velocidade de primeira fase de injeção melhor a condição de sanidade da peça com relação a ar preso ocasionado na câmara de injeção, isso devido ao grau de enchimento estar em 30% no estudo realizado.

Podemos concluir também que a velocidade de segunda fase de injeção muito baixa provoca defeitos de fundição no produto fundido chamado de junta fria ou outro defeito chamado falha de enchimento como está demonstrado de na figura 71B o defeito de junta fria.

De acordo com os fatos argumentados, verificou-se que as velocidades de injeção não influenciaram nos limites de resistência, mas que devido à sanidade do produto fundido ocasionado também pelas variações das velocidades de injeção diminuem o alongamento e mudam o limite de escoamento do produto.

No processo de fundição sob pressão os produtos fundidos obtidos sempre terão um nível de sanidade aceitável para aprovação conforme a Norma ASTM E 505 - *Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings*, portanto sempre se terá peças com algum tipo de defeito como microrechupe, bolhas aprisionadas, juntas frias entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 7549:2008. **Alumínio e suas ligas - Produtos laminados, extrudados e fundidos**. - Ensaio de tração.
- ABNT NBR ISSO 6506-1:2019 – **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell – Parte 1: Método de Ensaio**.
- ADAMANE, A., ARNBERG, L., FIORESE, E., TIMELLI, G., & BONOLLO, F. **Influence of Injection Parameters on the Porosity and Tensile Properties of High- Pressure Die Cast Al-Si Alloys: a Review**. EBSCOhost, 9(1), 43–53. 2015.
- AFS – The American Foundrymen’s Society, **Aluminum Casting Technology** – 2nd Edition, Des Plaines, Illinois, 1993.
- ALAR The Association of Light Alloy Refiners, **British and European Aluminium Casting Alloys**, Birmingham;
- AMMAR, H. R.; SAMUEL, A. M.; SAMUEL, F. H. **Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys**. International Journal of Fatigue, p.1024-1035, 2008.
- ANDRADE, MAYARA CAROLINE SILVA – **Avaliação da influência de parâmetros de injeção sobre a porosidade de uma liga de alumínio injetada pelo processo HPDC**, Dissertação de mestrado – 2019;
- ANDRESSEN B. (2005), **Die Casting Engineering: Hydraulic, thermal and Mechanical Process**, Marcel Dekker, New York.
- APELIAM, D; SHIVKUMAR, S; SIGWORTH G. **Fundamental Aspects of Heat Treatment of Cast Al Si Mg Alloys**. AFS Transactions, 1989. p. 727-742.
- APELIAM, D.; MAKHLOUF, M. M. **High integrity aluminum die casting**, 2006
- ASM American Society for Metals, **Metals Handbook 8th edition**, vol. 5; Forging and Casting, Metals Park, Ohio, L. K. MACHINERY Cold Chamber Die Casting Machine;
- ASTM E 505 - **Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings**.
- ASTM E112 - 12 - **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size** ASM Handbook. **Casting. v.15** - ASM, 1998
- BCS, Incorporated. **Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry**. 2005.

B. H. Hu, K. K. Tong, X. P. NIU and I. PINWILL, ***Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation***, Journal of Materials Processing Technology, 105 (2000) 128-133.

BIRCH, J. ***A porosidade em fundidos sob pressão***. Fundição e Serviços, São Paulo, fevereiro 2000. p. 52-61.

BOA, VICENTE CÉLIO O. FONTE. ***Fundição sob pressão*** – Tecnologia. CETEF – Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi, Itaúna, MG, 3/2000.

BONOLLO, FRANCO; GRAMEGNA, NICOLA; TIMELLI, GIULIO. ***High-pressure diecasting: Contradictions and challenges***. JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, v. 67, n. 5, abr. 2015.

BRESCIANI, E. F. ***Fundição sob pressão***. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1978. p. 210.

BREVICK, J. ***Die casting porosity guidebook***. Wheeling: North American Die Casting Association, 2009.

CAMPBELL, J.; HARDING, RICHARD A. ***The Liquid Metal. TALAT Training in Aluminium Application Technologies***. Birmingham, 1994

CAMPBELL, J. ***Castings***. Butterworth-Heinemann Ltda. - 1st edition, 287 p., 1991.

CAMPOS, CATARINA J. ***Redução das perdas de alumínio no processo de fabrico de peças Sonafi***. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2008.

CASTRO, PEDRO NUNO PIRES DIAS - ***Analisar e Estabilizar o Processo de Fundição Injetada de Alumínio para Minimizar a Rejeição no Produto*** - STA – Sociedade Transformadora de Alumínios - Dissertação de Mestrado

CETEF Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi, ***Teoria Fundamental do Processo de Fundição Sob Pressão***, Itaúna MG. CETEF Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi, Fundição Sob Pressão Tecnologia, 03/2000, Itaúna MG.

CHIAVERINI, V. ***Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica***. v.2. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

ABAL - Comissão Técnica Associação Brasileira do Alumínio - ABAL maio/2007 – ***Fundamentos e Aplicações do Alumínio***, 2007

COSTA, C. A. **Product Range Models in Injection Mould Tool Design**. Loughborough, Doctoral Thesis, Loughborough University, 2000.

DARGUSCH, M. S.; DOUR, G.; SCHAUER, N.; DINNIS, C.M.; SAVAGE, G. **The influence of pressure during solidification of high pressure die cast aluminum telecommunications components**. Journal of materials processing technology, v. 180, p. 37-43. 2006.

DE MOURA, CARLOS (2006). **Implementação da liga SAE 306 para redução de custos na injeção de alumínio** – Trabalho de graduação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis;

Des Plaines, Illinois, Oskar Frech GmbH + Co., D Schorndorf, **Seminar on Die Casting**;

DISPINAR, DERYA. **Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys**. Trabalho de Conclusão do Curso da Universidade de Birmingham, 2005.

NADCA - North American Die Casting Association. FAQ About Die Casting. Illinois, 2012

DUARTE, IBERÊ ROBERTO – **Estudo da liga AlSi7Mg após fundição e tratamento térmico de solubilização e envelhecimento** - Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de mestre em ciência e engenharia de materiais. Florianópolis Novembro de 2007.

DUARTE, IBERÊ ROBERTO - **Fundição sob pressão em câmara fria** -SOCIESC – Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, SC, 04/2004

ESSEL. Dureza Brinell. Disponível em <<http://essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa11.pdf>> Acesso em 2017;

FAURA, F; LOPEZ, J.; HERNANDEZ J. **On the optimum plunger acceleration law in the slow shot phase of pressure die casting machines**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.41, p. 173-91, 2001.

FONSECA, MARCO TÚLIO DA. **Teoria Fundamental do Processo de Fundição Sob Pressão** - CETEF – Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi, Itaúna, MG, 2000.

FUOCO, R. **Caracterização de Defeitos em Peças Fundida** 8º Congresso Internacional do Alumínio. EXPOALUMINIO, setembro de 2017;

FUOCO, R - **Minicurso de Fundição de ligas de Al** - Parte 3 - Fundição sob pressão de Alumínio - III Encontro Gaúcho de Fundidores, outubro de 2020;

FUOCO, R. **Curso Defeitos de fundição de origem metalúrgica em ligas alumínio-silício**. ABAL, 148 p., novembro de 1997;

FUOCO, R. e CABEZAS, C. **Importância do projeto dos sistemas de canais na geração de inclusões de óxidos**. CONAF, ABIFA, 1999;

FUOCO, R. e CORREA, E.R. **O problema de microporosidades em peças fundidas em ligas de alumínio**. CONAF, ABIFA, 1997;

FUOCO, R. **Efeito do tratamento de modificação na formação de microporosidade em ligas de alumínio A356**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996. 300 p. Tese (Doutorado);

FUOCO, R., CABEZAS, C. S., Correa, E. R. e BASTOS, M. A. **Study on gating system design for aluminum gravity castings using water models**. 1st International Conference on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings – Oct. 11 – 13, 1999 – Nashville, TN;

FUOCO, R., CORREA, E.R. **Inclusões de óxidos em ligas alumínio-silício: origem, caracterização e efeitos**. VI Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio – ABAL, setembro 1997, SP;

FUOCO, R., CORREA, E.R., BASTOS, M.A., ESCUDERO, L.S. **Metallographic characterization of some types of oxides inclusions in aluminum alloy castings**. In: 103rd AFS Casting Congress, Saint Louis, Missouri, 1999, p. 01-15.

FUOCO, R., CORREA, E.R., BASTOS, M.A., KOLOSOSKI, J. e SANTOS, R.G. **Projeto de sistemas de canais para fundição de alumínio por gravidade**. CONAF, ABIFA, 2001;

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 2ª ed, Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2007. p. 400.

GRUZLESKI, J. E; CLOSSET, B. M. **The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys**. The American Foundrymen's Society - AFS, Des Plaines, Illinois, 1990. p. 3-4, 13-20, 25-32, 44-45, 80, 85-86, 131, 141-145, 146-148, 170-174

INFOESCOLA. Ensaio de Tração. Disponível em <https://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>> Acesso em 2017;

JOONHONG PARK, CHUNGGIL KANG, **Microstructure and mechanical properties of AM50 alloy according to thickness and forming condition of the**

**products by a high pressure die-casting process**, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27 (10) (2013) 2955-2960

KARNI, Y. 1993. **Optimization of Process Variables for Die Casting**. In: 17th International Die Casting Congress and Exposition. (Paper G-T93-018), Cleveland, Ohio, USA.

KARUNAKAR, D.B. **Manufacturing Processes: Metal Casting**. Department Indian Institute of Technology, Rookee. 2009. (Apostila)

KAUFMAN, J. G., & ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications**. ASM International, 1a ed. Materials Park, OH, 2004.

KESTENBACH, H.J.; BOTA FILHO W.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

KIRKMAN, S. SHINKAGE - **Porosity: a guide correcting the problems**. Wheeling: North American Die Casting Association, 2006.

KOLOSOSKI, JORGE (2001). **Estudo de Sistema de Canais para Fundição**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas;

L. CIZEK, M. GREGER, L. PAWLICA, L. A. DOBRZANSKI and T. TANSKI, **Study of selected properties of magnesium alloy AZ91 after heat treatment and forming**, *Journal of Materials Processing Technology*, 157 (158) (2004) 466-471.

L. K. MACHINERY – **Cold Chamber Die Casting Machine Instruction Manual**, Model DCC 280E AB PLC, Hong Kong, 2003.

LOZANO, A. J.; PENHA, B. S. - **Microstructure-properties correlation of pressure die cast eutectic aluminum-silicon alloys for escalator steps** part I. *Materials characterization*, v. 56, p. 169-177, 2005

MALAVAZI, J, **Apostila de Fundição sob Pressão**, SENAI/Osasco - 2008;

MALAVAZI, J. **Manual de Fundição sob Pressão**. Presidente Altino, SP. Votorantim Metais, 2010. 21 p.

MEDEIROS, M. **História da fundição**. São Paulo: Salus, 2009;

MENEGON, DANUSA R. - **Estudo da Eficiência da Gaseificação e desoxidação com Nitrogênio na Fusão de Ligas de Alumínio SAE 305**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, 2012.

MOREIRA, PAULO. - ***Efeito da taxa de resfriamento e dos Tratamentos térmicos sobre as Propriedades Mecânicas da liga Al-Si-Mg (A356.0) Fundida.*** Dissertação de mestrado. Dezembro de 2011.

NADCA. Product Specification Standards for Die Casting, 2012.

NIU, X. et al. ***Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys.*** Journal of Material Processing Technology, 2000. p. 119-127.

N. MAHALLAWY, M. A. TAHA, E. POKORA and F. KLEIN, ***On the influence of process variables on the thermal conditions and properties of high pressure die-cast magnesium alloys,*** Journal of Materials Processing Technology, 73 (1998) 125-138.

MORO NORBERTO, ***Processo de fabricação,*** 2007, p 18 – Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Gerência Educacional de Metalmeccânica Curso Técnico de Mecânica Industrial - Florianópolis 2017

NYAHUMWA, C., GREEN, N.R. e CAMPBELL, J. ***Effect of mold filling turbulence on fatigue properties of cast aluminum alloys.*** 102nd AFS Casting Congress, Atlanta, Georgia – U.S.A., 1998.

OLIVEIRA, ANDRÉ F. ***Redução Controlada do Teor de Hidrogênio em Ligas de Alumínio.*** Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

FRECH OSKAR GmbH + Co., D-73614 Schorndorf, ***Seminar on Die Casting,*** 2000.

OUTMANI, I., FOUILLAND-PAILLE, L., ISSELIN, J., & EL MANSORI, M. (2017). ***Effect of Si, Cu and processing parameters on Al-Si-Cu HPDC castings.*** Journal of Materials Processing Technology, 249 (November 2016), 559–569. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.043>;

RAVI, B. ***Design for castability.*** IIT Bombay, dez. 2006.

REIKHER, A., BARKHUDAROV, M. R. (2007), ***Casting: An Analytical Approach,*** SpringerVerlag, London.

Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.13, n. 4, p. 1435-1465, out./dez. 2013.

ROHDE, R. A. ***Metalografia preparação de amostras, uma abordagem prática.*** Santo Ângelo, 2010

RONDON, VINICIUS; NETO, CARLOS DE MOURA. **Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas, estáticas e dinâmicas, da liga fundida al-si-mg-e357 envelhecida**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 11 a 15 de abril de 2011.

RUNYORO, J., BOUTORABI, S.M.A., CAMPBELL, J. **Critical gate velocities for film-forming casting alloys: a basis for process specification**. AFS Transactions, v. 92-37, p. 225-234, 1992.

TORRE, JORGE. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Hemus, 2004.

UNISINOS. **Equipamentos – Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV**. Disponível em <<http://www.unisinos.br/itt/ittfuse/equipamentos/microscopio-eletronico-de-varredura-mev>> Acesso em 2017;

WALKINGTON, W. **Gas porosity: a guide to correcting the problems**. Wheeling: North American Die Casting Association, 2006.

WALKINGTON, W. G. & MURRAY, M. **Die Casting Defects: Causes and Solutions**. 1a ed. Rosemont, IL, NADCA, 2003

WANG, L.; TURNLEY, P.; SAVAGE, G. **Gas content in high pressure die casting**. Journal of Materials Processing Technology, p.1510-1515, 2011.

WEG – **Injeção de Alumínio, Módulo II**, Máquinas de Injeção Sob Pressão, Jaraguá do Sul, SC.

WHEELING: North American Die Casting Association, 2006

VERRAN, G.O.; REBELLO, M.A. e OLIVEIRA, C.G. 2001. **Comparação entre a simulação via software e os resultados experimentais na Fundição Sob Pressão de Ligas de Alumínio**. Fundição & Serviços,

VERRAN, G. O; MENDES, R. P K; ROSSI, M. A. **Avaliação da influência dos parâmetros de injeção sobre a formação de defeitos em peças injetadas em ligas de alumínio**. In: III COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, 2005. CD-ROM.

VINARCIK, E. J. **High integrity die casting processes**. New York: John Wiley & Sons, 2003.

<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/#:2020>

<https://www.coladaweb.com/fisica/optica/microscopio>

<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-Assunto=108>

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Moldagem\\_por\\_injecao](https://pt.wikipedia.org/wiki/Moldagem_por_injecao)

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_de\\_Leidenfrost](https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_de_Leidenfrost)

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---