

**Analisar e Estabilizar o Processo de Fundição Injetada de Alumínio
para Minimizar a Rejeição no Produto na
STA – Sociedade Transformadora de Alumínios**

Pedro Nuno Pires Dias de Castro

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Hermenegildo Pereira

Orientador na STA: Eng.º Manuel Casais



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

2013-01-28

Para os meus pais

Resumo

No mundo atual, existe uma maior consciencialização da importância da qualidade em meio industrial. Métodos como o *Six Sigma* e o DMAIC, são utilizados na melhoria contínua dos processos para diminuir a variabilidade e eliminar as causas dos defeitos, indo assim ao encontro das necessidades e expectativas dos clientes.

O problema proposto, é a elevada rejeição das peças e a instabilidade do processo de fundição injetada de alumínio. Para o solucionar, o projeto desenvolveu-se em duas fases.

A primeira fase do projeto consistiu, inicialmente, na análise do estado atual do processo de fundição injetada de alumínio. Para tal, foram identificadas quais as variáveis que influenciavam a ocorrência de defeitos nas peças fundidas. Posteriormente, procedeu-se a um tratamento de dados históricos para identificar as peças que apresentavam maior rejeição após a lacagem, consideradas as peças críticas. Finalmente procedeu-se à realização de cartas de controlo para avaliar a variabilidade do processo.

A segunda fase do projeto, consistiu na determinação das variáveis que maior influência tinham na qualidade das peças fundidas. Procedeu-se assim, a uma análise de Pareto para identificar os defeitos de fundição que provocavam maior rejeição nas peças de fundição, que designamos de defeitos críticos. Em seguida, determinaram-se as variáveis que provocam a ocorrência desses defeitos e realizou-se uma análise experimental, com o objetivo de identificar uma possível relação entre as variáveis e o aparecimento de defeitos. Para finalizar, criou-se um manual de suporte à decisão no chão de fábrica, de modo a facilitar o ajuste das variáveis de fundição, aquando da observação de defeitos nas peças, aumentando assim a estabilidade do processo.

Análise do projeto: Concluiu-se, pela observação das cartas de controlo, que o processo não estava em controlo estatístico, denotando grande variabilidade. Identificou-se ainda, através da análise às causas da rejeição da peça mais crítica, que o defeito crítico eram os poros. Da análise experimental dos parâmetros do processo, constatou-se uma possível relação entre a diminuição da temperatura, a diminuição da velocidade de 1ª fase, o aumento da velocidade de 2ª fase e a diminuição do comprimento de 2ª fase, com a redução da ocorrência de poros e consequente aumento da qualidade das peças de fundição injetada de alumínio.

Analyzing and stabilizing the aluminum die casting process to minimize rejection in products

Abstract

In today's world, there is greater awareness that quality is very important in industrial facilities. Methods such as *Six Sigma* and DMAIC, are used in the continuous improvement of processes in order to reduce the processes variability and eliminate the causes of defects, and thus meet the needs and expectations of customers.

The proposed issue is to decline the high rejection of pieces and the instability of aluminum die casting process. In order to figure this out, the project was divided into two parts.

Initially, the first part of the project consisted in the analysis of the current state of aluminum die casting process. To do so, the process was studied in order to identify which variables may influence the occurrence of defects on die casting parts. Later, a historical data processing was made to identify the parts that showed greater rejection after lacquering and considering the critical parts. To complete the analysis, control charts were made to evaluate the variability of the process. The second and final part of the project was to determine the variables that had the greatest influence on the quality of the die casting parts. Thus a Pareto analysis was made to identify which die casting defects are responsible for major rejections in die casting parts, so-called the critical defects.

Finally, a Manual was made on the factory floor to support decisions, so that the variables adjustment was easier when observing defective pieces, therefore increasing the stability of the process.

Project analysis: through the observation of control charts it was concluded that the process was not in statistical control, showing great variability. By analyzing the most critical piece of the rejections, it was identified that porous was the critical defect. From experimental analysis a possible link was observed between temperature lowering, the decrease in the speed of the first phase, , the second phase speed increase and the decrease in the length of phase 2, with the reduction of porous occurrence and the consequent increase of the quality of die-casting aluminum parts.

Agradecimentos

Agradeço à STA pela oportunidade de realizar este projeto, em particular ao meu orientador Eng.º Manuel Casais pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos. Agradeço também aos chefes da secção Sr. Torres e Sr. Alves por toda a sua disponibilidade.

Ao Eng.º Hermenegildo Pereira pela orientação e conselhos dados durante o projeto.

Ao INEGI, nomeadamente ao Eng.º Rui Neto e ao Eng.º Ricardo Paiva pela disponibilidade demonstrada e colaboração.

À Diana e ao Camané, pelo apoio e companhia durante estes meses de realização do projeto.
À Bi-Trupla, que me acompanha desde sempre.

Índice de Conteúdos

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Apresentação da Empresa STA..... | 1 |
| 1.2 | Problema proposto e objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Processo de fundição injetada de alumínio na STA..... | 2 |
| 2 | Estado da Arte..... | 5 |
| 2.1 | Fundição injetada..... | 5 |
| 2.1.1 | Máquinas de fundição injetada | 6 |
| 2.1.2 | Variáveis do processo de fundição injetada..... | 8 |
| 2.1.3 | Defeitos de fundição | 9 |
| 2.2 | Alumínio..... | 10 |
| 2.2.1 | Ligas de alumínio..... | 10 |
| 2.2.2 | Limpeza do banho de alumínio..... | 10 |
| 2.3 | Controlo estatístico do processo | 11 |
| 2.3.1 | Diagrama de Pareto..... | 11 |
| 2.3.2 | Diagrama de causa-efeito..... | 11 |
| 2.3.3 | Carta de Controlo | 12 |
| 2.3.4 | Diagrama de dispersão..... | 14 |
| 2.4 | Desenho de Experiências | 15 |
| 3 | Análise do processo de fundição injetada na STA | 16 |
| 3.1 | Identificação das variáveis do processo de fundição injetada de alumínio | 16 |
| 3.2 | Identificação das peças críticas | 18 |
| 3.3 | Análise estatística da taxa de enchimento e da temperatura do molde. | 20 |
| 3.3.1 | Cartas de Controlo..... | 20 |
| 4 | Identificação das variáveis com influência na qualidade das peças de fundição injetada. | 26 |
| 4.1 | Identificação dos defeitos críticos | 26 |
| 4.2 | Determinação das causas dos defeitos críticos | 28 |
| 4.3 | Análise experimental..... | 29 |
| 4.4 | Manual de suporte à decisão no chão de fábrica..... | 33 |
| 5 | Conclusões e perspectivas de trabalho futuro..... | 34 |
| | Bibliografia..... | 36 |
| ANEXO A: | Fatores para a construção de cartas de controlo para variáveis | 37 |
| ANEXO B: | Dados históricos sobre a rejeição das peças lacadas | 38 |
| ANEXO C: | Dados recolhidos aos valores da taxa de enchimento..... | 39 |
| ANEXO D: | Valores das temperaturas do molde antes e depois da lubrificação..... | 40 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Organigrama da STA | 1 |
| Figura 2 - <i>Layout</i> da fábrica da STA | 2 |
| Figura 3 - Fluxograma do processo de fundição injetada de alumínio na STA | 3 |
| Figura 4 - Máquina de fundição injetada Itaipresse 400 | 4 |
| Figura 5 - Prensa para corte de gito | 4 |
| Figura 6- Corte do gito [6]..... | 6 |
| Figura 7 - Máquina de câmara quente [6]..... | 7 |
| Figura 8 - Máquina de câmara fria [6]..... | 8 |
| Figura 9- Diagrama de causa-efeito..... | 12 |
| Figura 10 - Equações para o cálculo da amplitude | 14 |
| Figura 11 - Equações para o cálculo dos limites de controlo para amplitudes..... | 14 |
| Figura 12 - Equações para o cálculo da média | 14 |
| Figura 13 - Equações para o cálculo dos limites de controlo para médias | 14 |
| Figura 14 - Diagrama de causa-efeito para defeitos de fundição | 16 |
| Figura 15- Diagrama de Pareto para identificar as peças críticas..... | 18 |
| Figura 16 - Desenho do manípulo 30900-650.2 | 19 |
| Figura 17 - Desenho do manípulo 4000-217.2 | 19 |
| Figura 18 - Gito do manípulo 30900-650.2 | 21 |
| Figura 19 - Carta de controlo de amplitudes para a taxa de enchimento | 21 |
| Figura 20 - Carta de controlo de médias para taxa de enchimento..... | 22 |
| Figura 21 - Carta de controlo de amplitudes para a temperatura antes da lubrificação | 23 |
| Figura 22 - Carta de controlo de médias para a temperatura antes da lubrificação..... | 23 |
| Figura 23 - Carta de controlo de amplitudes para a temperatura depois da lubrificação | 24 |
| Figura 24 - Carta de controlo de médias para a temperatura depois da lubrificação | 24 |
| Figura 25 - Diagrama de Pareto para defeitos de fundição | 27 |
| Figura 26 - Microfotografia de um poro..... | 27 |
| Figura 27 - Diagrama de causa-efeito com possíveis causas de ocorrência de poros | 28 |
| Figura 28 - Diagrama de dispersão Temperatura Vs % Defeituosas..... | 30 |
| Figura 29 - Diagrama de dispersão de Velocidade de 1ª Fase Vs % Defeituosas..... | 31 |
| Figura 30 - Diagrama de dispersão de Velocidade 2ª Fase Vs % Defeituosas..... | 31 |
| Figura 31 - Diagrama de dispersão comprimento de 2ª Fase Vs % Defeituosas..... | 32 |
| Figura 32 - Manual de suporte à decisão no chão de fábrica- porosidade..... | 33 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Máquina usada em função da liga | 6 |
| Tabela 2 - Peças críticas e sua rejeição..... | 19 |
| Tabela 3 - Valores do volume da camisa e da densidade da liga de alumínio | 20 |
| Tabela 4 -Defeitos críticos de fundição e suas % rejeição | 26 |
| Tabela 5 - Dados recolhidos da análise experimental | 30 |

1 Introdução

No contexto atual do mundo industrial, em que a concorrência é cada vez maior, urge a necessidade de as empresas estarem sempre num contínuo processo de melhoria para cumprir com as exigências e prazos dos clientes. A qualidade dos processos e dos produtos é cada vez mais um fator de diferenciação entre concorrentes. A STA é uma empresa que quer ser reconhecida pela qualidade dos seus produtos, sendo para isso necessário que a variabilidade dos processos seja muito reduzida. Este estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade do processo alvo para programar e efetuar melhorias.

1.1 Apresentação da Empresa STA

A STA – Sociedade Transformadora de Alumínios, SA fica situada em Gueifães no concelho da Maia e é uma empresa fundada em 1989, fruto de uma parceria com o grupo belga Sobinco, sendo a sua especialização direcionada para a produção e desenvolvimento de ferragens para portas e janelas, nomeadamente para caixilharias de alumínio. A STA tem como visão e objetivo ser líder do mercado em que atua, trabalhando para ter o reconhecimento dos seus clientes a nível de profissionalismo, satisfação, qualidade e inovação. Para tal, conta com uma equipa de 155 profissionais qualificados e é certificada segundo a norma ISO 9001 desde 2006, representando a marca SOFI que está no mercado há mais de 40 anos.

A STA e Sobinco apostam fortemente numa cooperação no plano da Investigação e Desenvolvimento de novos produtos, partilhando os seus potenciais tecnológicos e industriais, assim maximizando o seu *know-how*. [1]

A STA está dividida em vários departamentos (Figura 1), tendo o projeto incidido no departamento de produção, nomeadamente na secção de fundição. [1]

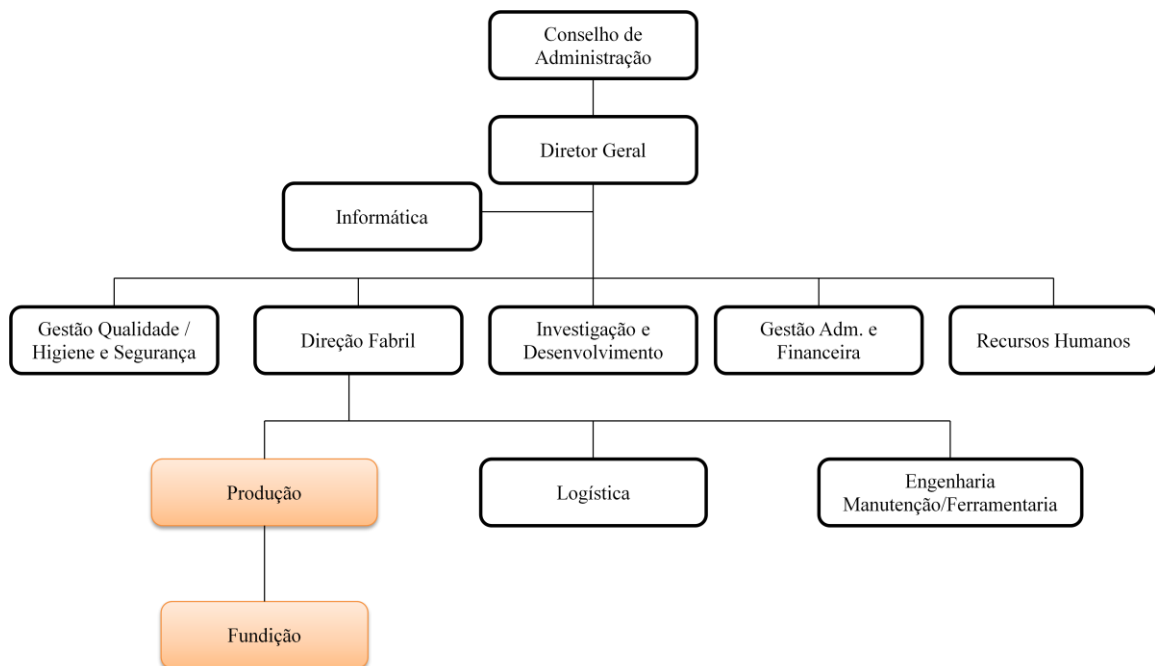


Figura 1 - Organograma da STA

O projeto cingiu-se ao processo de fundição injetada de alumínio a alta pressão, sendo possível identificar a sua localização no Layout da fábrica (Figura 2).

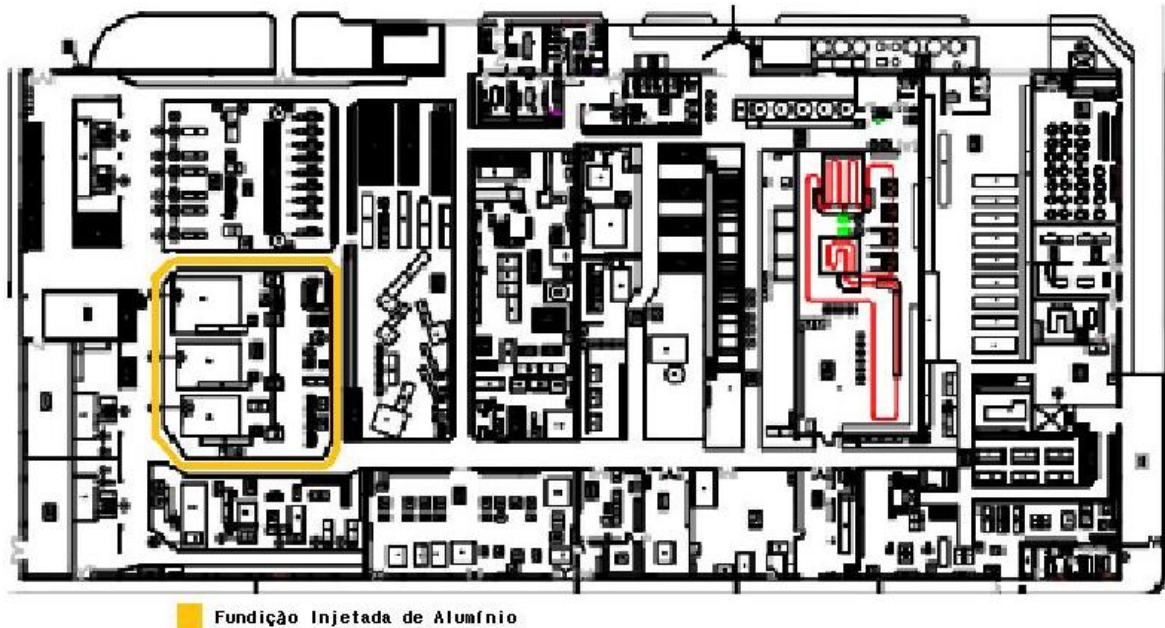


Figura 2 - Layout da fábrica da STA

1.2 Problema proposto e objetivos

O processo de fundição injetada de alumínio é um dos processos utilizados na produção de peças pela STA, sendo sobre este que incide o projeto. As peças produzidas na STA têm como finalidade serem um produto estético, pelo que, o objetivo é obter-se um produto final visualmente aceitável, indo ao encontro das especificações do cliente. O acabamento final das peças é a pintura eletrostática a pó (lacagem).

O problema apresentado consistia na instabilidade do processo de fundição injetada de alumínio e na elevada rejeição de peças produzidas por esse processo.

O objetivo principal do projeto é definir uma série de ações que levem à estabilização do processo de fundição injetada, melhorando assim a qualidade das peças. Estas ações seriam apresentadas num manual de suporte à decisão no chão de fábrica. Ficando assim com uma base de informação para no futuro se atuar sobre as causas raiz do problema.

Para que o objetivo fosse concretizado, foi necessário identificar os defeitos que provocam a rejeição dos produtos e determinar as suas causas, de modo a obter a informação necessária para agir sobre os fatores e variáveis que realmente influenciam na qualidade das peças.

1.3 Processo de fundição injetada de alumínio na STA

O processo de fundição injetada de alumínio na STA está representado no seguinte fluxograma (Figura 3).

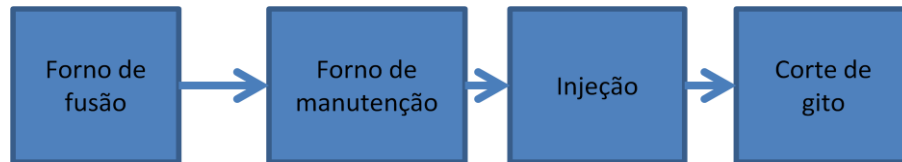


Figura 3 - Fluxograma do processo de fundição injetada de alumínio na STA

São utilizadas duas ligas de alumínio para fundição:

- AlSi₁₀Mg – designada de liga azul;
- AlSi₉Cu₃ – designada de liga vermelha.

As ligas de alumínio são fundidas num forno de fusão, a uma temperatura definida de 760° C, sendo transportadas depois para o forno de manutenção, que pode estar entre os 665°C e os 695°C, onde ficam à espera de serem injetadas.

As ligas são depois transportadas por uma colher (mecanismo automática) do forno de manutenção para a camisa de injeção da máquina.

Existem duas máquinas de fundição injetada de alumínio:

- Buhler 400
- Itaipresse 400

Neste projeto apenas foi utilizada a Itaipresse 400 (Figura 4), com as seguintes características:

- Força de Fecho: 400 toneladas
- Dimensões máximas do molde (Horizontal x Vertical): 610 x 610
- Dimensões mínimas do molde (Horizontal x Vertical): 450 x 450
- Curso de abertura máxima da máquina: 1295 mm

A liga é depois injetada na cavidade do molde e solidifica, sendo extraída depois já em forma de gito, de onde segue para uma prensa de corte (Figura 5) para se fazer a separação entre a peça e o sistema de alimentação, respiros e masselotes.



Figura 4 - Máquina de fundição injetada Italpresse 400



Figura 5 - Prensa para corte de gito

2 Estado da Arte

2.1 Fundição injetada

Os exemplos mais antigos de fundição por pressão de injeção remontam a meados do século XIX. Foi concedida uma patente a Sturges em 1849 para a primeira máquina de fundição para impressão operada manualmente. O processo limitou-se à impressão durante os 20 anos seguintes, mas posteriormente, começou a ocorrer o desenvolvimento de outro tipo de peças até ao final do século. Em 1982, as aplicações comerciais incluíam fonógrafos e caixas registradoras, e a produção em massa de diversos tipos de peças começou no início do século XX.

As primeiras ligas eram baseadas em várias composições de chumbo e estanho, entrando o seu uso em declínio com a introdução em 1914 das ligas de zinco e alumínio, seguidas das ligas de magnésio e cobre. Em meados de 1930, já estavam disponíveis muitas das ligas modernas utilizadas hoje em dia.

O Processo de fundição injetada evoluiu de processos de baixa pressão de injeção para técnicas como a fundição injetada sob pressão.[2]

A fundição injetada é um processo de produção de peças metálicas com dimensões precisas, bem definidas e de superfícies lisas ou texturizadas. Isto é conseguido injetando metal líquido a grande velocidade e sob grandes pressões em moldes reutilizáveis. Comparado com outros processos de fundição, a fundição injetada está no topo em termos de velocidade e pressão. As altas velocidades traduzem-se num fluxo de injeção turbulento. O processo é muitas vezes descrito como a distância mais curta entre a matéria prima e o produto final. [3]

O processo de fundição injetada é uma operação repetitiva onde se obtêm altas taxas de produção de peças idênticas e é conseguido, forçando o metal sob pressão para um molde metálico, que é dividido em duas (ou mais) partes.

Os meios moldes são montados nos pratos da máquina de fundição injetada, uma parte é fixa-Molde Lado Fixo (está montado no prato fixo da máquina), e a outra é móvel – Meio Lado Móvel. Para se iniciar o processo, estas duas partes são mantidas juntas de forma segura pelo mecanismo de aperto da máquina de modo a suportar uma pressão elevada. A força exercida no molde pode ir de 100 a 2000 toneladas (ligas de alumínio). Em seguida, o metal é injetado para o interior do molde, onde foi gravada a forma negativa da peça a produzir, arrefecendo rapidamente. Quando o metal está solidificado, os dois meios moldes são separados e o gito é cortado, para separar a peça e o sistema de alimentação, respiros e masselotes (Figura 6).[4]

Para se proceder à injeção do metal, é necessário que este esteja no estado líquido, para tal, a liga é fundida num forno de fusão a temperaturas superiores ao ponto de fusão da mesma e simultaneamente são aplicados tratamentos para eliminar as suas impurezas. O metal é posteriormente transportado por fornos de cadinhos refratários para os fornos de manutenção, onde é mantido a temperaturas ideais para a injeção.

As peças produzidas por este processo podem estar sujeitas a diversos tipos de solicitações, mantendo um bom comportamento. São peças que necessitam de pouca maquinaria posterior, são de fácil mecanização e tratamento superficial. A matéria prima utilizada consiste em ligas de metais não ferrosos de alumínio, zinco, magnésio, cobre e chumbo. As ligas de zinco, chumbo e estanho, são classificadas como ligas de baixo ponto de fusão, com

valores de temperatura inferiores a 385°C. As ligas de alumínio e magnésio são consideradas como ligas de ponto de fusão moderado (de 621°C a 704°C), sendo que as ligas à base de cobre, são ligas de elevado ponto de fusão com valores superiores a 899°C. [5]

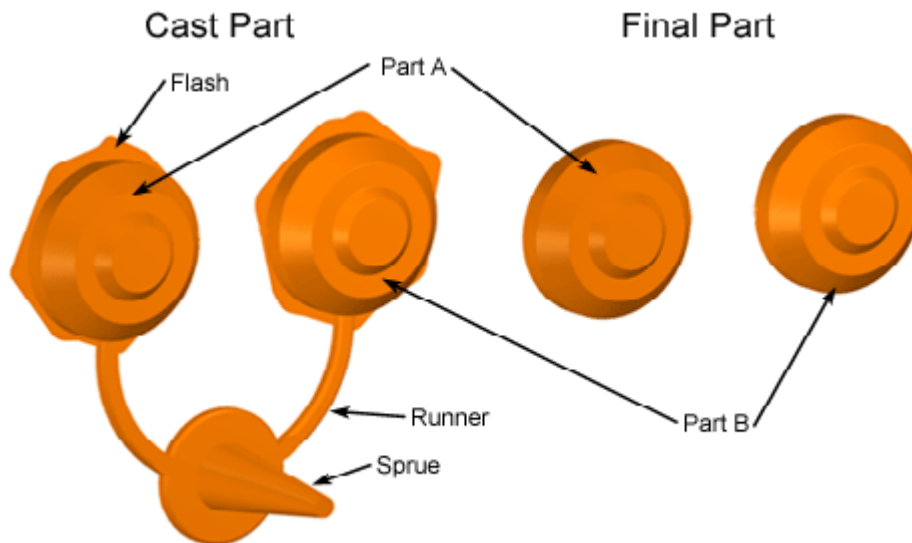


Figura 6- Corte do gito [6]

2.1.1 Máquinas de fundição injetada

Devido às diferentes temperaturas de fusão das várias ligas usadas na fundição injetada, existem dois tipos de máquinas: máquinas de câmara quente e máquinas de câmara fria (Tabela 1).

Tabela 1 - Máquina usada em função da liga

| | Al | Zn | Mg | Cu |
|-----------------------------------|----------|---------|----------|--------|
| Tipo de Máquina | | | | |
| câmara fria | Sim | Sim | Sim | Sim |
| câmara quente | Não | Sim | Sim | Não |
| Injeções/hora | 40-20 | 200-550 | 75-400 | 40-200 |
| Pressão de Injeção (bar) | | | | |
| Peças Normais | 400 | 100-200 | 300-400 | |
| Peças Técnicas | 400-600 | 200-300 | 400-500 | |
| Peças sujeitas a pressão interior | 800-1000 | 250-400 | 800-1000 | |

2.1.1.1 Máquinas de câmara quente

As máquinas de câmara quente [Figura 7] são indicadas para ligas com baixo ponto de fusão, que não atacam os cadinhos, cilindros e pistões. O mecanismo de injeção encontra-se imerso no metal fundido, num forno ligado à máquina.

Estas máquinas produzem a elevadas cadências. O ciclo pode variar de menos de 1s a 30 s dependendo do tamanho e peso da peça. O metal enche a cavidade do molde muito rapidamente (normalmente entre 5 e 40 ms). [5]

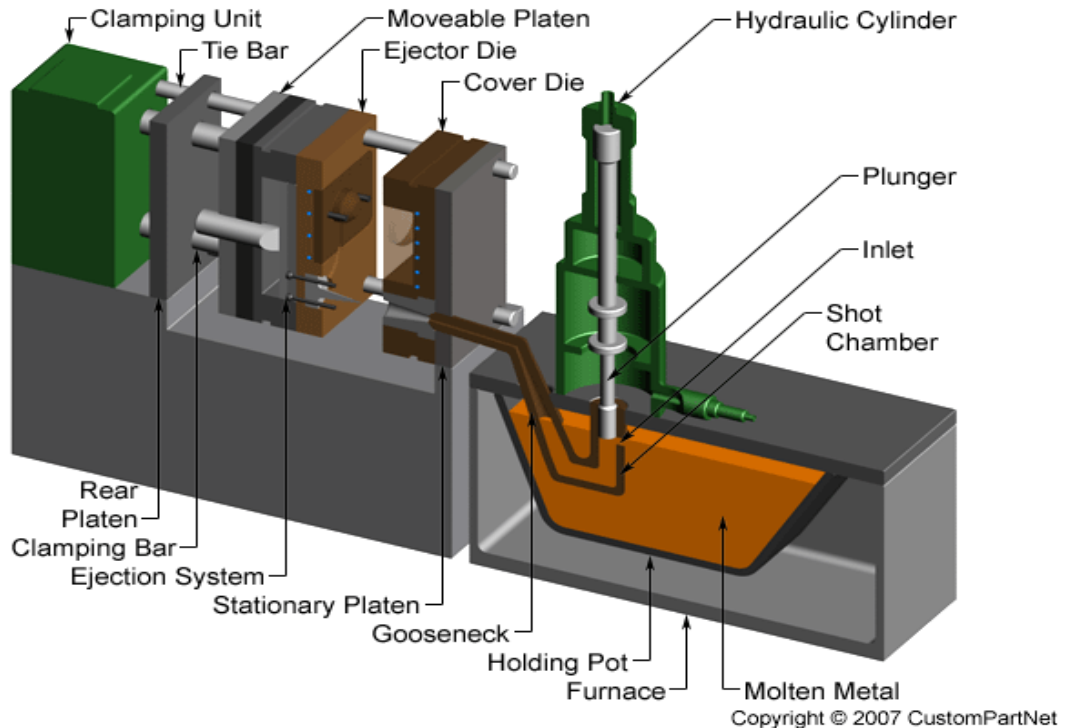


Figura 7 - Máquina de câmara quente [6]

2.1.1.2 Máquinas de câmara fria

Nas máquinas de câmara fria (Figura 8), o pistão e o cilindro hidráulico não se encontram submersos no metal fundido, isto faz com que se encontrem menos sujeitos ao ataque por erosão, do calor gerado no forno, devido às altas temperaturas atingidas. São usadas para injeção de ligas de alto ponto de fusão.

O metal fundido é vazado numa camisa de injeção, através de uma abertura, esta operação pode ser feita manualmente ou através de mecanismo automático. O pistão é acionado hidráulicamente, forçando o metal a entrar no molde sob pressões elevadíssimas. Para manter a pressão sobre o metal que se encontra no interior, é necessário maior quantidade de metal vazado.

O processo neste tipo de máquina é mais lento, pois o metal vazado ainda tem que ser transportado do forno de manutenção para a camisa de injeção. A construção desta máquina tem que ser mais robusta e resistente, pois são atingidas pressões superiores. [5]

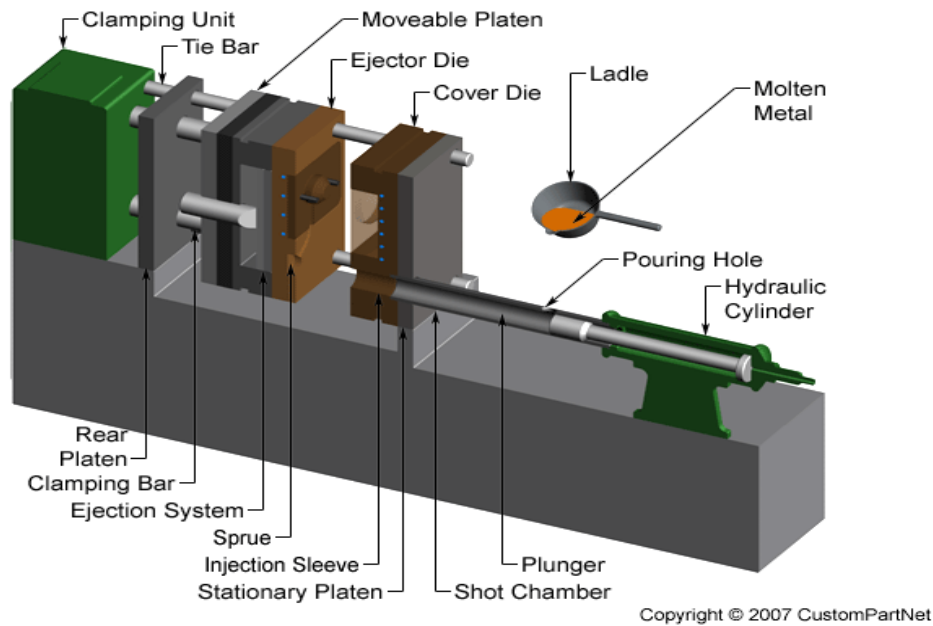


Figura 8 - Máquina de câmara fria [6]

2.1.2 Variáveis do processo de fundição injetada

2.1.2.1 Temperatura do metal no forno de manutenção

A qualidade da peça é influenciada pela temperatura a que o metal está no forno de manutenção, este tem que estar a uma temperatura que permita que o metal esteja totalmente no estado líquido mas não a uma demasiado elevada, para evitar que haja alteração da estrutura e fluidez do metal. [5]

2.1.2.2 Velocidade do pistão de injeção

- Velocidade da 1ª fase: é a velocidade do pistão de injeção, quando este percorre a camisa desde o seu estado recuado até ao momento em que a camisa está completamente preenchida pelo metal, exatamente antes de se dar início à entrada do metal na cavidade do molde. Esta fase é muito importante, pois uma velocidade mal ajustada pode provocar o aprisionamento de ar no interior da camisa, impedindo o seu escape, podendo provocar o aparecimento de porosidades na peça [5].
- Velocidade da 2ª fase: é a velocidade do pistão de injeção, desde o exato momento em que o metal entra na cavidade do molde até o preencher completamente, servindo também para pressionar o metal enquanto este solidifica, pois nesta fase, o metal encontra-se entre as paredes da cavidade do molde e o pistão. [5].
- 3ª fase: é onde ocorre a pressão de compactação, esta pressão serve para contrariar a contração do metal durante a solidificação, evitando assim que o preenchimento da cavidade do molde não seja completo. [5]

2.1.2.3 Curso de injeção

São os comprimentos das 3 fases de injeção, são de elevada importância porque estão diretamente relacionadas com a velocidade de injeção de cada fase, sendo que tem que haver

uma “solução de compromisso” entre a velocidade e comprimento para se obter uma peça com qualidade.

2.1.2.4 *Taxa de enchimento*

A taxa de enchimento é a razão entre o volume de metal injetado e o volume da camisa de injeção. É de grande importância, pois um dos grandes problemas da fundição injetada reside na evacuação do ar durante a injeção, pelo que taxas de enchimento baixas levam a uma maior quantidade de ar que entra na cavidade do molde, devendo portanto ser evitadas. A taxa de injeção correta varia entre 60% - 80%. [7]

2.1.2.5 *Lubrificação do molde*

A lubrificação, ou agente desmoldante, é uma variável importante no processo de fundição, pois cria uma película entre o metal fundido e o molde, reduzindo a fricção entre eles. Existem lubrificantes à base de solvente e à base de água. O lubrificante tem a função de facilitar a separação entre o gito e o molde no momento da extração, arrefecer o molde depois de cada injeção, evitar a adesão do metal ao molde, e a erosão do mesmo, promover um melhor fluxo de metal e um preenchimento completo da peça fundida. A quantidade de lubrificante a aplicar tem que ser criteriosa, pois uma aplicação insuficiente ou excessiva pode provocar inúmeros problemas tanto na máquina como na peça fundida. [4]

2.1.2.6 *Temperatura do molde*

A temperatura do molde tem que ser a correta, pois uma temperatura baixa inibe a alimentação, provocando contração no metal, mau enchimento do molde e colagem da peça aos moldes. Uma temperatura excessivamente alta enfraquece as peças, criando problemas na extração e piora as propriedades mecânicas e acabamento superficial da peça. [8]

2.1.3 *Defeitos de fundição*

No processo de fundição injetada podem aparecer muitos defeitos, provenientes de situações diferentes. Os defeitos são:

- Juntas frias – Têm a aparência de uma racha na peça, mas são devidos a duas frentes de metal oxidado que solidificam antes de se encontrarem, podem assumir várias formas, dependendo do grau de oxidação das frentes de metal e da temperatura da liga na junção.
- Mau enchimento – Resultam da divisão do fluxo de metal durante o enchimento. Se o metal está muito frio, o tempo de enchimento é demasiado longo ou o metal é mal orientado no enchimento da cavidade, dá-se a solidificação inicial do metal antes do molde ser completamente preenchido, criando lacunas na peça.
- Porosidades – As porosidades apresentam-se sob a forma de cavidades com paredes lisas, sensivelmente esferoidais, sem comunicação para o exterior. A parede interna é geralmente brilhante, podendo ser mais ou menos oxidada dependendo da origem da formação da porosidade. As origens da formação das porosidades são o aprisionamento de ar durante o enchimento, o aprisionamento de ar na camisa de injeção, o aprisionamento de gás na camisa de injeção, o aprisionamento de gás proveniente do lubrificante (desmoldante), a libertação de gás dissolvido no metal ou a libertação de gás pela presença de óxidos no metal.

- Rechupes – Têm o aspeto de uma cavidade, mas com diferente forma e aspeto da porosidade. As suas paredes são irregulares e de faces dendríticas. Formam-se devido à contração do volume de metal durante a solidificação, quando há ausência de fornecimento de metal líquido.
- Bolhas- Apresentam-se como porosidades mas manifestam-se à superfície da peça. No caso de peças finas, podem aparecer nas duas faces da mesma parede. O modo de formação é o mesmo das porosidades, com a exceção que a libertação de hidrogénio é insuficiente para causar defeitos deste tipo
- Fissuras – São fissuras intercrystalinas de formas irregulares. Ocorrem quando a liga contrai subitamente no fim da solidificação. Geralmente, o risco de fissura é mais elevado em zonas que combinam tensões de contração e pontos quentes.
- As gotas frias aparecem na forma de agregados, mais ou menos circulares, compreendidas na peça, a maior parte das vezes são soluções de continuidade com o metal circundante, diferenciando-se apenas pela sua estrutura mais fina. As gotas frias são partes do metal que foram projetadas contra as paredes da cavidade do molde, antes de entrar em contacto com o resto do metal. São depois refundidas e constituem a estrutura heterogénea da peça.[8]

2.2 Alumínio

O alumínio é um metal de baixa densidade (2.7 g/cm^3), com um baixo ponto de fusão (660°C) e com um alto ponto de ebulição (cerca de 2000°C), sendo estas características muito apetecíveis para a indústria de fundição. Apresenta ainda uma boa condutibilidade térmica, alta condutibilidade elétrica e devido à película de óxido Al_2O_3 que se forma na sua superfície, é um material com uma boa resistência à corrosão.

O Alumínio e as suas ligas, devido às características que têm, são utilizados em diversas áreas industriais, tais como aeronáutica, automobilística, ferroviária, naval, elétrica, aparelhos eletrodomésticos, construção civil, química e em outros tipos de aplicações como móveis, equipamento têxtil e artigos decorativos. [9]

2.2.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são de extrema importância no mundo atual, vindo a ser desenvolvidas de modo a melhorar as suas propriedades. Na fundição, o desenvolvimento de propriedades como fluidez e vazamento permitem melhorias no processo.

Os elementos de liga mais importantes são o Silício (Si), Cobre (Cu), Magnésio (Mg), Manganês (Mn) e Zinco (Zn).[10]

2.2.2 Limpeza do banho de alumínio

A limpeza do banho de alumínio tem 2 objetivos:

- Eliminar óxidos, carbonetos e nitretos do banho;
- Reduzir o teor de hidrogénio.

São vários os processos que podem ser utilizados, sendo que a opção por um, ou combinação deles, depende se a matéria prima é nova ou reutilizada e das condições do processo de

fundição. Esses processos são: Utilização de sais de limpeza, conhecidos por fluxos; Utilização de Azoto; Procedimento impeller; Tratamento de banho com pastilhas; Limpeza mecânica do banho; Combinação de filtro e impeller.[10]

2.3 Controle estatístico do processo

No mercado, os requisitos de qualidade e os tempos de entrega dos produtos impostos pelos clientes são cada vez mais exigentes, de modo que para os satisfazer, é necessário que o processo de produção seja estável e robusto. A variabilidade normal do processo tem que assegurar a obtenção de produtos dentro das tolerâncias definidas pelo cliente, minimizando também, os custos do produtor.

A estatística é a arte e ciência de coletar, classificar, apresentar, interpretar e analisar dados, bem como tirar conclusões do processo do qual os dados foram retirados. Usando ferramentas estatísticas é possível avaliar o estado do processo e identificar medidas para reduzir a sua variabilidade, conseguindo assim, melhorar a estabilidade do processo e consequente qualidade do produto.

Algumas ferramentas da qualidade utilizadas:

- Histograma;
- Folha de verificação;
- Diagrama de Pareto;
- Diagrama causa-efeito (Diagrama de Ishikawa);
- Diagrama de processo;
- Diagrama de dispersão;
- Carta de controle. [11]

2.3.1 Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto é assim denominado em honra de Vilfredo Pareto (1848-1923), que notou que em certas economias, a maioria da riqueza pertencia a uma minoria da população, cerca de 80% da riqueza pertencia apenas a 20% da população, daí também se chamar regra dos 80/20, sendo popularizado por J.M. Juran, que o aplicou a problemas industriais, pois observou que a ocorrência de defeitos seguia uma distribuição semelhante à de Pareto.

O Diagrama de Pareto é simplesmente uma distribuição de frequências de atributos organizados por categorias, sendo utilizado no DMAIC, tanto na análise como na medição. É muito útil para identificar múltiplas causas de falta de qualidade, organizando num gráfico as causas por ordem decrescente de frequência da esquerda para a direita. Através deste diagrama, podem-se identificar rapidamente os problemas que ocorrem com mais frequência, separando os poucos problemas vitais, dos muitos triviais. [12]

2.3.2 Diagrama de causa-efeito

O diagrama causa-efeito, é também conhecido como diagrama de Ishikawa, pois foi o Dr. K. Ishikawa que primeiro o utilizou em meados de 1940.

O diagrama de causa-efeito serve para identificar, exibir e examinar as possíveis causas de uma qualquer condição observada, sendo utilizado no DMAIC nos passos de análise e implementação. Deve-se identificar a característica de qualidade ou medida de desempenho, para a qual uma relação de causa efeito deve ser estabelecida e em seguida, através de um *brainstorming*, conceber categorias das variáveis principais que afetam a condição observada, sendo que normalmente o diagrama de causa-efeito tem 6 categorias principais (Figura 9). As variáveis ou causas a identificar, são depois indexadas à categoria principal a que pertencem.

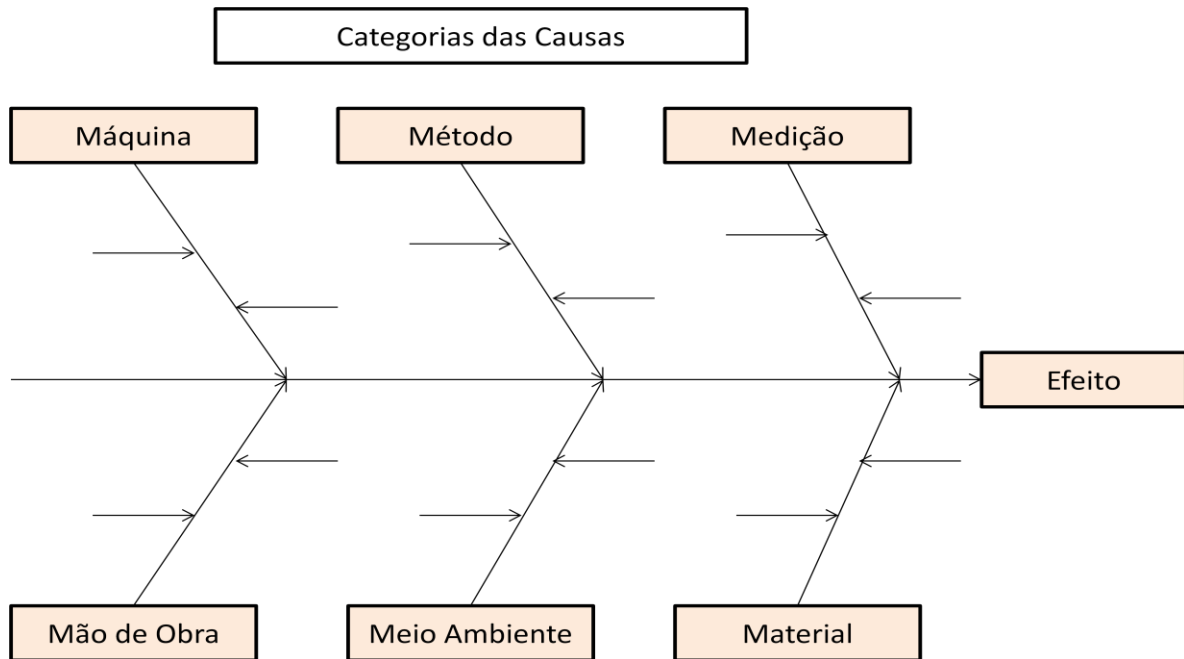


Figura 9- Diagrama de causa-efeito

O diagrama final deve incluir todas as variáveis conhecidas que possam afetar a característica de qualidade, atendendo a que não é um documento fechado, pois todas as novas variáveis identificadas, devem ser incluídas no diagrama já existente. Por fim, as variáveis devem ser classificadas e ordenadas de maneira a serem identificadas aquelas que mais impacto têm no problema. [12]

2.3.3 Carta de Controle

A carta de controle tem como principais objetivos verificar se um processo está em controle estatístico e identificar causas assinaláveis de variação para que possam ser eliminadas, sendo desenvolvida pelo Dr. Walter Shewhart em meados de 1920.

A carta de controle consiste num conjunto de dados recolhidos e convertidos em forma de gráfico, usando também esses dados para calcular os limites de controle. Os limites de controle, superior e inferior, são uma espécie de fronteiras das causas comuns da variabilidade do processo, sendo normalmente posicionados 3 desvios padrões acima e abaixo da linha central. A linha central, representa o valor médio da característica de qualidade em análise.

Se os dados recolhidos ficarem dentro dos limites, significa que o processo está em controle. Se pelo contrário os dados ficarem fora dos limites, significa que o processo está fora de

controle, sendo necessário tomar medidas para identificar e eliminar as causas especiais para que o processo fique em controle. Porém, existem outros sintomas que podem indicar que o processo está fora do controle, mesmo estando os pontos dentro dos limites, tais como:

Sintomas que indicam que o processo está fora de controle:

- Um ou mais pontos fora dos limites de controle;
- Sete pontos consecutivos estão do mesmo lado da linha central;
- Intervalo de sete pontos consecutivos em estado decrescente ou crescente;
- 2 em 3 pontos consecutivos fora da zona do limite 2σ ;
- 4 em 5 pontos consecutivos fora da zona do limite σ ;
- 14 pontos consecutivo alternando acima e abaixo;
- 14 pontos consecutivos dentro do limite σ .

Existem dois tipos de causas de variabilidade:

- Causas comuns – referem-se a diversas fontes de variação que provocam o acaso ou variação natural, são inerentes ao processo e comportam-se de acordo com uma determinada distribuição de probabilidade. São difíceis de serem eliminadas;
- Causas especiais (ou assinaláveis) – referem-se a qualquer fator que crie instabilidade e que não pode ser explicado por nenhuma distribuição, não são inerentes ao processo e tomam valores imprevisíveis. Devem ser eliminadas para colocar o processo em controle.

Existem 2 tipos principais de cartas de controle, que são diferenciadas pelo tipo de característica em avaliação:

- Cartas de controle para variáveis – são utilizadas para dados medidos numa escala contínua. São associadas com a distribuição normal e outras distribuições contínuas.
- Cartas de controle para atributos – são utilizadas para dados associados a defeitos ou defeituosas, em que a classificação é binária, do género boa ou não boa. São associadas com as distribuições binomial e de Poisson. [12]

2.3.3.1 Cartas de controle para variáveis

As cartas de controle para variáveis são mais poderosas que as cartas de controle para atributos, pois necessitam de menos dados para adquirir informação semelhante, e um valor mensurável contém muito mais informação que um simples bom-mau.

Este tipo de cartas são utilizadas aos pares, uma carta de dispersão para medir a variabilidade entre grupos e uma carta de posição para medir a variabilidade dentro do grupo. As cartas mais usadas são: as cartas de médias \bar{x} (medida de posição) que medem a média de um subgrupo; e as cartas de amplitude R (medida de dispersão) que medem a amplitude entre os subgrupos.

Para as cartas de controle \bar{x} -R, costumam-se usar subgrupos de tamanho n constante, sendo $2 \leq n \leq 5$ o tamanho que normalmente se utiliza. As cartas devem ter pelo menos 20-25 pontos (subgrupos).

A linha central (LC), o limite inferior de controle (LIC) e o limite superior de controle (LSC) são calculados de forma diferente para cada gráfico. Para a carta de controle R:

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}$$

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

Figura 10 - Equações para o cálculo da amplitude

$$LC = \bar{R}$$

$$LIC = D_3 \times R$$

$$LSC = D_4 \times \bar{R}$$

Figura 11 - Equações para o cálculo dos limites de controle para amplitudes

Para a carta de controlo \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m}$$

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_3}{m}$$

Figura 12 - Equações para o cálculo da média

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \times \bar{R}$$

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \times \bar{R}$$

Figura 13 - Equações para o cálculo dos limites de controle para médias

A2, D3 e D4 são constantes das cartas de controlo de Shewhart e dependem do tamanho (n) do subgrupo (ANEXO A).

A carta R deve ser a primeira a ser avaliada, pois se esta estiver fora de controlo, então é impossível avaliar a carta \bar{x} . Se a causa da carta R estar fora de controlo for a ocorrência de uma causa especial, então, deve-se eliminar esse ponto e estabelecer os novos limites com os pontos restantes, isso deve ser feito até se obter uma carta que reflita que o processo está em controlo. Assim que os limites estejam estabelecidos, continuam-se a recolher dados para avaliar o comportamento do processo.[12]

2.3.4 Diagrama de dispersão

É uma ferramenta estatística que permite exibir dados associados a duas variáveis. Os dados são ordenados e exibidos aos pares, sendo o primeiro passo no estudo de uma potencial relação entre duas variáveis. Não se devem retirar conclusões sem antes utilizar outras ferramentas que melhor demonstrem a relação entre as variáveis. Para evitar uma conclusão errada na observação do diagrama, deve-se colocar a variável considerada dependente, no eixo vertical e a variável independente no eixo horizontal.

Nos diagramas de dispersão podem-se observar três casos:

- Correlação positiva – O aumento de uma variável é acompanhada pelo aumento da outra;

- Correlação negativa – O aumento de uma variável é acompanhado pela diminuição da outra.
- Inexistência de correlação – Não parece haver qualquer ligação entre as variáveis.

Uma das formas de quantificar a relação entre duas variáveis é através do coeficiente de correlação R , tendo sempre em atenção que correlação não implica necessariamente causalidade. [12]

2.4 Desenho de Experiências

O desenho de experiências consiste em alterar propositadamente os *inputs* de um processo para se observarem as alterações correspondentes nos *outputs*, permitindo criar modelos matemáticos que transmitem melhor a sua verdadeira relação. Estes modelos matemáticos contêm informação de como otimizar o processo, reduzir a variação e tornar o nosso *output* robusto a fatores que não conseguimos controlar. O objetivo, é obter informação que permita melhorar as características do processo, reduzir tempos e reduzir custos.

Para se utilizar o desenho de experiências, é necessário conhecer-se muito bem o processo, de modo a ser possível proceder a uma boa classificação das variáveis. Existem 4 categorias de variáveis num processo:

- Variáveis de saída (*output*) – variáveis que são medidas para avaliar o desempenho do produto.
- Variáveis constantes – variáveis que se mantêm constantes durante qualquer experiência;
- Variáveis consideradas ruído – variáveis que não se conseguem manter constantes durante a experiência, nem durante a produção normal. É para estas que se tenta colocar o processo robusto (insensível);
- Variáveis experimentais – variáveis que se querem variar durante a experiência

Compreender que fatores (variáveis de entrada/*inputs*) são críticos para melhorar o desempenho é importante para saber que fatores devem ser controlados e que tolerâncias devem ter. É também importante conhecer os fatores que não são críticos, pois permite que se aumentem as tolerâncias nesses fatores, diminuindo assim os custos de produção.

No desenho de experiências, podem-se optar por vários tipos de planos, dependendo do número de fatores em avaliação e em quantos níveis se querem variar esse fatores. Os planos podem ir desde os mais simples, em que apenas um fator é avaliado (faz-se variar este fator a vários níveis), até aos mais complexos, como o Plano fatorial completo, Plano fatorial fracionado e Método de Taguchi, em que estão em avaliação vários fatores, sendo cada um diferente a vários níveis.

Como é muito difícil realizar todas as experiências necessárias para combinar todos os fatores em estudo, o método de Taguchi é a melhor opção, pois requer o mínimo de experiências possíveis para a obtenção de informação importante e robusta.

As técnicas estatísticas mais utilizadas para inferir a relação das variáveis de entrada com a variável de saída são a Regressão e a ANOVA. [13]

3 Análise do processo de fundição injetada na STA

O processo de fundição injetada é complexo, atendendo a que o seu conhecimento vem não do conhecimento científico, mas também do conhecimento empírico, onde a experiência que se obtém ao longo de anos de trabalho no processo, tem grande importância, pois permite que se adquira sensibilidade às variações e problemas do processo. As peças produzidas pelo processo de fundição injetada na STA, são peças que se destinam à pintura electrostática em pó (lacagem), tendo como principal atributo a estética.

Para se ter um conhecimento significativo do processo de fundição injetada na STA, procedeu-se a um estudo criterioso baseado em bibliografia, juntamente com o acompanhamento diário do processo de fundição injetada. Assim, é possível identificar as variáveis do processo de fundição injetada, identificar as peças que apresentam maior rejeição após lacagem e analisar a estabilidade do processo.

3.1 Identificação das variáveis do processo de fundição injetada de alumínio

A qualidade das peças fundidas é avaliada pela rejeição ou não das peças de fundição, provocada pela presença de defeitos de fundição nas mesmas. Para se identificarem as possíveis causas da variação da qualidade das peças fundidas, elaborou-se um Diagrama de causa-efeito (Figura 14).

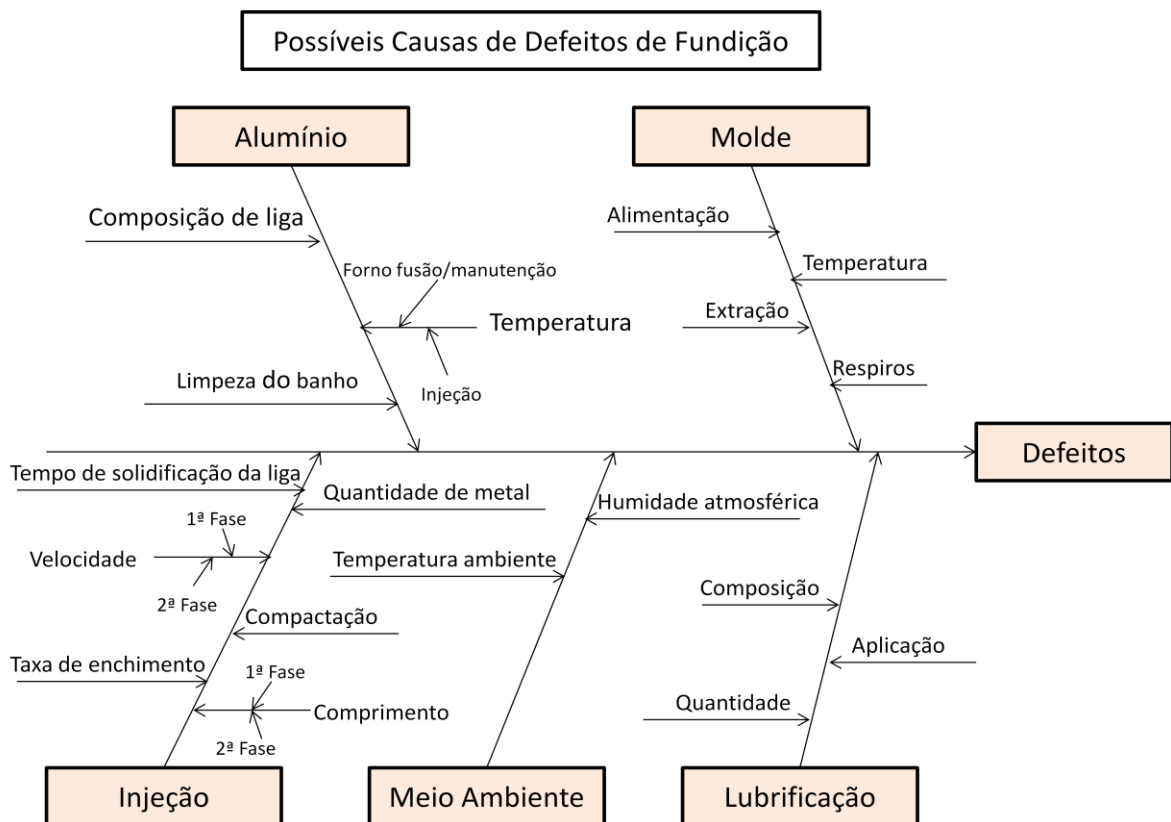


Figura 14 - Diagrama de causa-efeito para defeitos de fundição

O Diagrama de causa-efeito foi dividido em 5 categorias principais do processo alvo, tendo-se indexado as possíveis causas identificadas à categoria correspondente. As categorias e variáveis identificadas foram as seguintes:

- Metal – O tipo de liga de alumínio é uma variável muito importante para a qualidade dos fundidos, pois cada liga tem características diferentes que proporcionam comportamentos diferentes. A liga tem que ser fundida (forno de fusão) e mantida (forno de manutenção) dentro dos parâmetros de temperatura corretos, tal como a sua limpeza tem que ser adequada, pois uma liga mal desoxidada e com uma má desgaseificação (pretende-se o mínimo de hidrogénio dissolvido), pode ser uma causa de defeitos significativa. A temperatura de injeção da liga vazada também tem que ser a adequada, para ter uma boa fluidez (não a uma temperatura demasiado quente que possa deformar a peça ou aumentar demasiado a temperatura do molde).
- Molde – Uma má conceção do molde é desastrosa para a qualidade da peça, pois pode provocar perdas significativas, difíceis de corrigir pelos outros parâmetros do processo de fundição. O sistema de alimentação, os respiros de ar e o sistema de extração têm de ser cuidadosamente concebidos para que o metal possa preencher corretamente o molde, evitando assim o aprisionamento de ar na peça e evitando deformações na peça no ato de extração. Outra das variáveis a ter em atenção, é a temperatura a que o molde se encontra no momento da injeção do metal, deve-se ter em conta não só a temperatura do molde na sua totalidade, mas também localmente, pois pode haver zonas mais propícias à ocorrência de defeitos.
- Injeção – A escolha dos parâmetros de injeção (variáveis) tem que ser criteriosa. É necessária uma correta combinação entre as várias velocidades de injeção, os seus comprimentos e momentos de entrada. A velocidade de 1ª fase tem que ser ajustada, para se ter o mínimo de ar retido no metal na camisa de injeção e para que o metal não solidifique antes de encher a peça. A velocidade de 2ª fase tem que ser elevada para se conseguir um escoamento correto no interior do molde, mas tem que permitir que o ar contido no molde seja evacuado. A pressão de compactação (3ª fase) tem que ser suficiente para reduzir o impacto da contração do metal, sendo que a sua aplicação deve ser no momento certo para evitar que o metal solidifique antes de preencher a totalidade da cavidade do molde. Outras variáveis com influência significativa, são a quantidade de metal vazado, a taxa de enchimento e o tempo de solidificação da liga. A quantidade de metal vazada tem que ser a correta, pois tem influência nos parâmetros de 1ª e 2ª fase. A taxa de enchimento deve ser alta, para diminuir a presença de ar na camisa de injeção. O tempo de solidificação não deve ser muito curto, para não haver alterações nas características do metal.
- Lubrificação – A composição da lubrificação utilizada, a forma de ser aplicada e a quantidade aplicada são possíveis causas da variação da qualidade da peça. Uma aplicação errada pode provocar que diferentes zonas do molde tenham temperatura e proteção diferente. A quantidade de lubrificante tem que ser a indicada para arrefecer o molde, mas não em demasia, pois excesso de lubrificante pode provocar o aparecimento de gás no interior do molde.
- Ambiente – A qualidade das peças pode ser afetada pela variação da temperatura ambiente e da humidade atmosférica, pois pode haver interação com o metal fundido.

3.2 Identificação das peças críticas

Para se identificarem as peças com maior rejeição (peças críticas), procedeu-se ao tratamento de dados históricos relativos aos 3 primeiros trimestres de 2012, sendo apenas tidas em atenção as peças lacadas.

O tratamento dos dados consistiu em classificar as peças, de modo a observar-se quais tinham mais peso no conjunto total de peças produzidas nos 3 trimestres, e ordenou-se por ordem decrescente (ANEXO B) . Para tal utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\% \text{ rejeição} = \frac{n^{\circ} \text{ de peças rejeitadas por manípulo}}{n^{\circ} \text{ de peças rejeitadas no total da produção}}$$

Em seguida, elaborou-se um diagrama de Pareto para identificar as peças críticas (Figura 15).

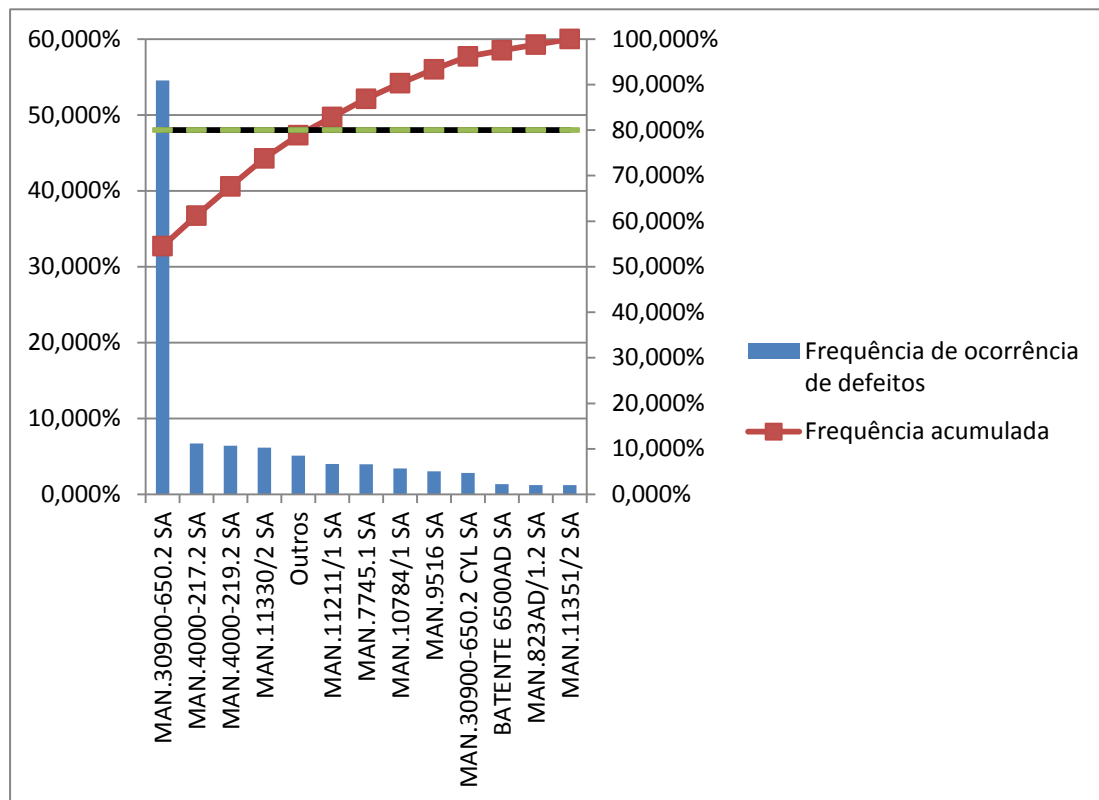


Figura 15- Diagrama de Pareto para identificar as peças críticas

Pela análise do diagrama de Pareto e seguindo o princípio do 80/20, observou-se que a 80% das rejeições correspondiam 4 manípulos, sendo que o manípulo 30900-650.2 (1º na classificação) (Figura 16) tinha quase 10 vezes mais rejeição que o manípulo 4000-217.2 (2º na classificação) (Figura 17). Os 4 manípulos que correspondem a quase 80% das rejeições são as peças críticas (Tabela 2).

Tabela 2 - Peças críticas e sua rejeição

| Descrição | Frequência de ocorrência | Frequência acumulada |
|--------------------|--------------------------|----------------------|
| MAN.30900-650.2 SA | 54,519% | 54,519% |
| MAN.4000-217.2 SA | 6,691% | 61,211% |
| MAN.4000-219.2 SA | 6,416% | 67,627% |
| MAN.11330/2 SA | 6,157% | 73,784% |

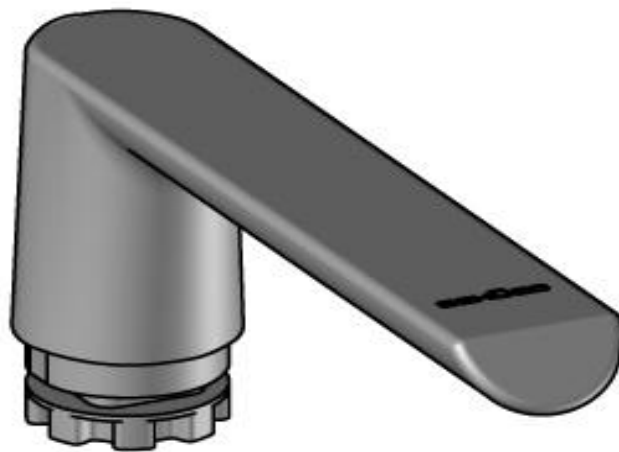


Figura 16 - Desenho do manípulo 30900-650.2



Figura 17 - Desenho do manípulo 4000-217.2

3.3 Análise estatística da taxa de enchimento e da temperatura do molde.

Para se analisar a variabilidade do processo, optou-se por escolher variáveis do processo, determinantes para as características da qualidade das peças fundidas, que facilitassem a recolha de dados e permitissem a utilização de cartas de controlo por variáveis, pois estas cartas são mais poderosas que as de atributos.

Abdicou-se de uma análise estatística às rejeições de produto, optando pelas análises à taxa de enchimento de metal e à temperatura do molde, antes e depois da lubrificação.

A peça escolhida para a análise da taxa de enchimento foi o manípulo 30900-650.2, peça classificada em 1º lugar em termos de rejeições (peça crítica).

Para a análise da temperatura do molde, foi escolhido o molde da mesma peça.

3.3.1 Cartas de Controlo

3.3.1.1 Taxa de enchimento

No cálculo da taxa de enchimento, usando os valores da Tabela 3, procedeu-se à pesagem dos gitos (Figura 18) e utilizaram-se as seguintes equações:

- Para o cálculo da taxa de enchimento, utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Taxa de Enchimento}(\%) = \frac{\text{Volume de metal vazado (cm}^3\text{)}}{\text{Volume da camisa (cm}^3\text{)}}$$

- Para o cálculo do Volume de metal vazado, utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Volume de metal vazado (cm}^3\text{)} = \frac{\text{massa do gito (g)}}{\text{densidade do metal (}\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\text{)}}$$

Tabela 3 - Valores do volume da camisa e da densidade da liga de alumínio

| Variáveis | |
|---|---------|
| Volume da camisa (cm ³)= | 933,053 |
| Densidade da liga AlSi ₁₀ Mg (g/cm ³)= | 2,65 |



Figura 18 - Gito do manípulo 30900-650.2

Colheram-se 25 amostras, cada uma com um subgrupo de 4 gitos, obtendo assim os dados (ANEXO C) para a criação da carta de controlo R (Figura 19) e carta de controlo \bar{x} (Figura 20):

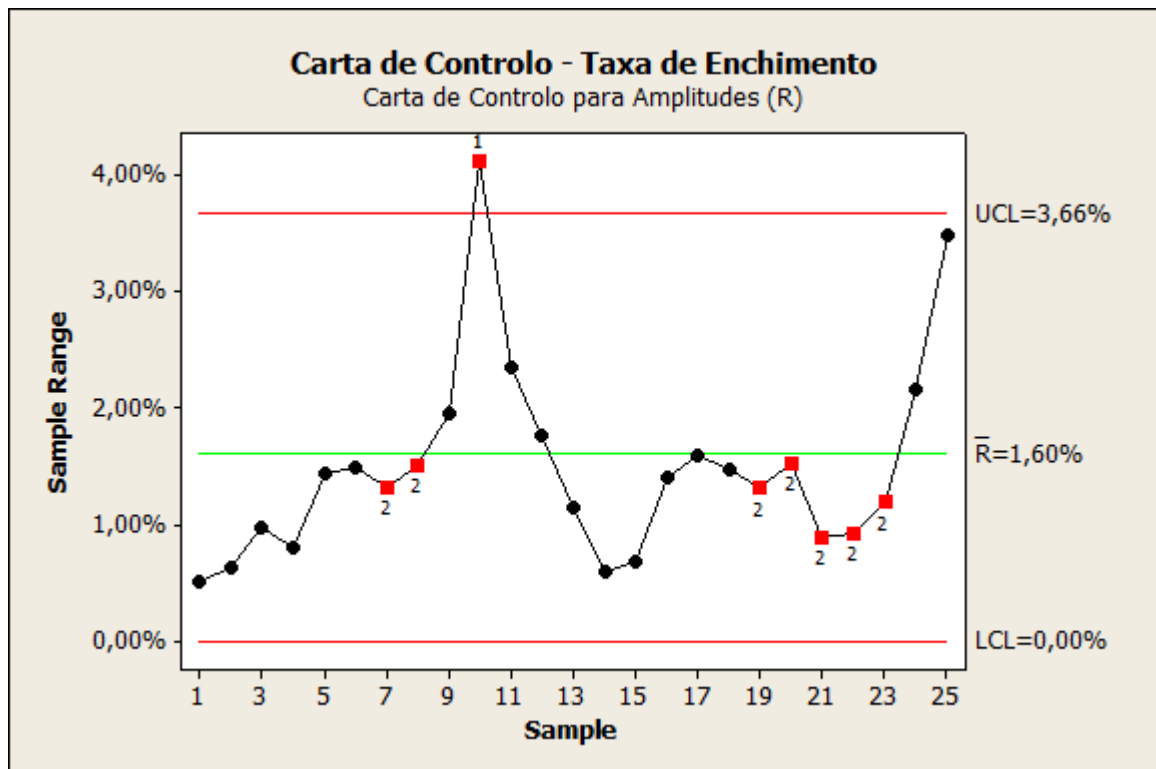


Figura 19 - Carta de controlo de amplitudes para a taxa de enchimento

Pela observação da carta de controlo para amplitudes, conclui-se que o processo não está em controlo. Verificou-se uma causa especial no ponto 10 e demasiados pontos seguidos (pelo menos 7) abaixo da linha central, como do ponto 1 ao ponto 8 e do ponto 13 ao ponto 23, ou seja, um dos sintomas que indicam que o processo não está em controlo.

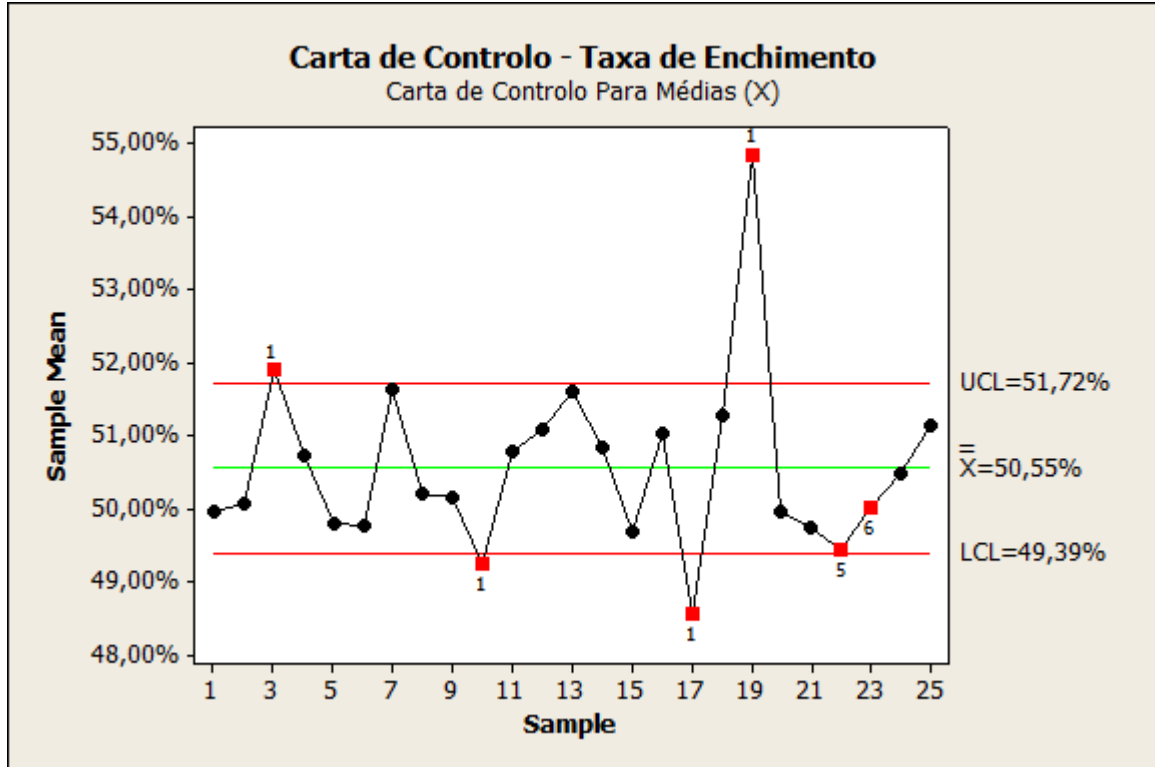


Figura 20 - Carta de controlo de médias para taxa de enchimento

Analisando a carta de controlo para médias, constatou-se que o processo também não se encontra em controlo. Os pontos 3, 10, 17, 19 são causas especiais e também se verifica que o ponto 23 é o 4º em 5 pontos fora da zona limite de σ .

Detetaram-se causas especiais, que se podem dever a vários fatores, entre os quais, os parâmetros da colher de transporte estarem mal ajustados.

Pode-se observar também que a taxa de enchimento é em média 50.55%, quando para uma melhor qualidade das peças, ela deveria ser entre 60% e 80%.

3.3.1.2 Temperatura do molde

Na análise da temperatura do molde, recolheram-se dados (ANEXO D) em duas situações: antes e depois do molde ser lubrificado. Foram utilizadas 22 amostras, cada uma delas com um subgrupo de 4 medições. Estas 4 medições do subgrupo, correspondem às temperatura das 4 cavidades do molde do manípulo 30900-650.2. A temperatura do molde foi medida recorrendo-se a um termómetro de infravermelhos.

De seguida, apresentam-se as cartas de controlo R e \bar{x} , para a temperatura do molde antes da lubrificação (Figura 21 e Figura 22) e depois da lubrificação (Figura 23 e Figura 24).

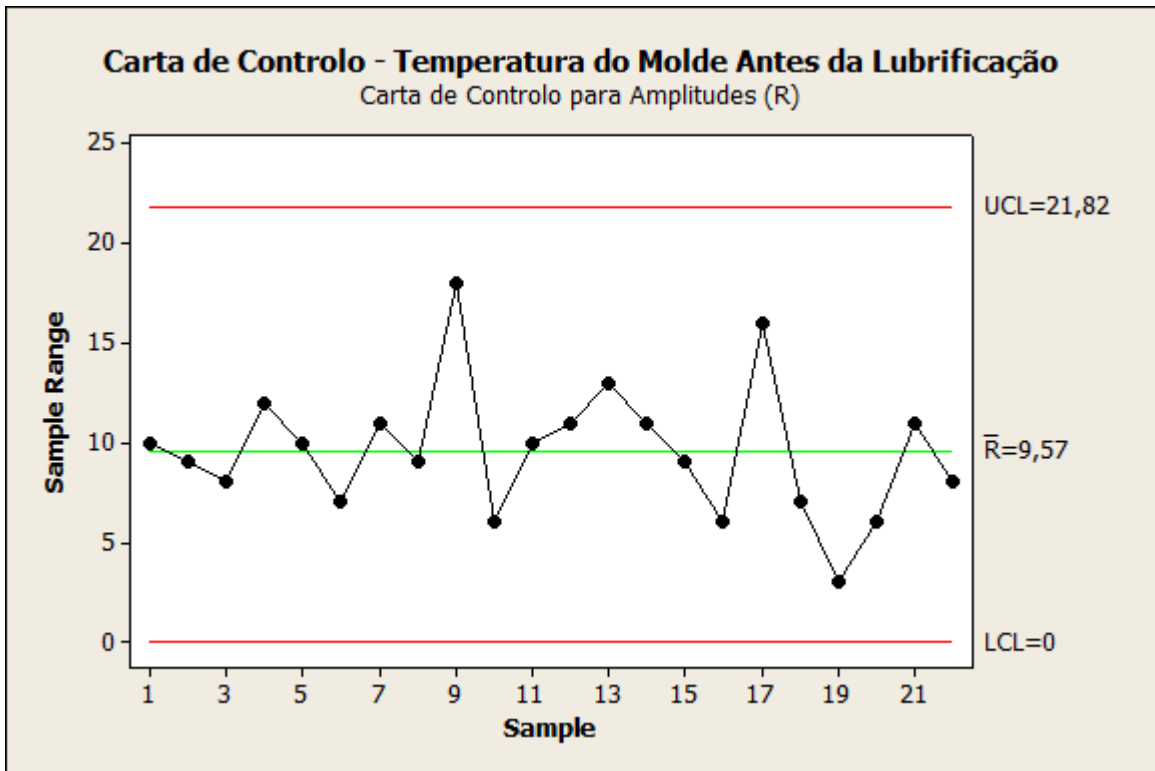


Figura 21 - Carta de controle de amplitudes para a temperatura antes da lubrificação

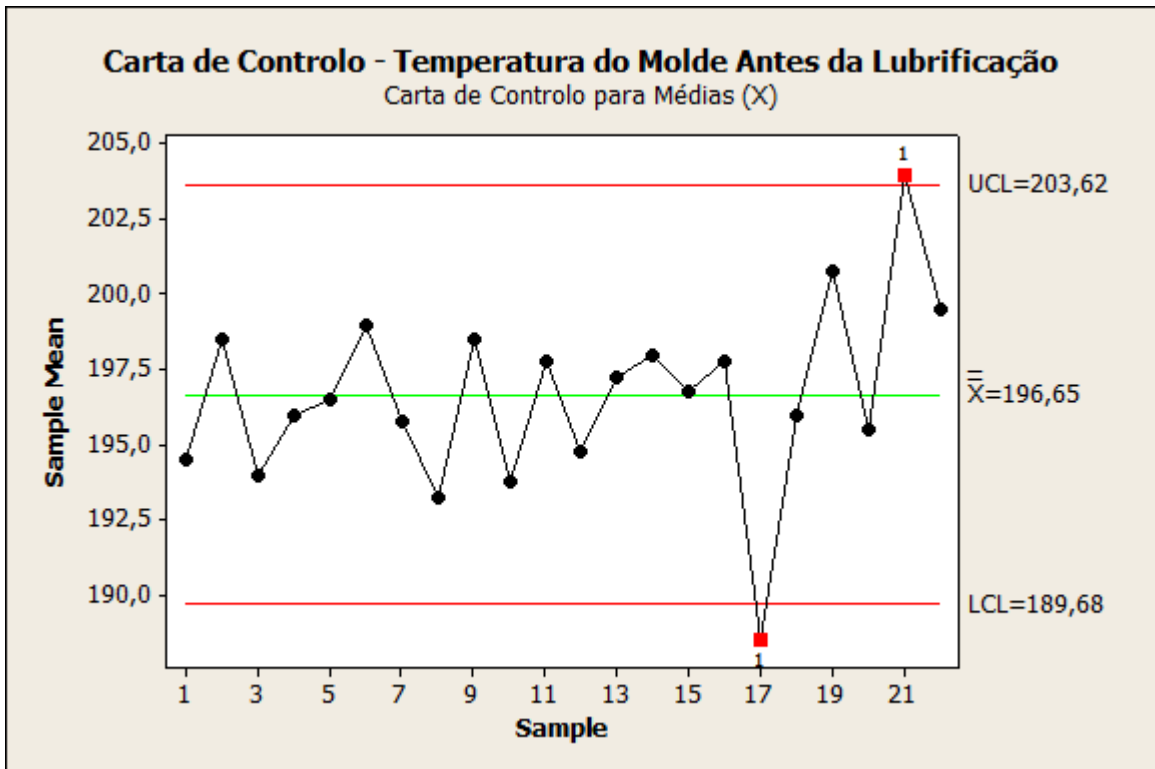


Figura 22 - Carta de controle de médias para a temperatura antes da lubrificação

Antes da lubrificação constatou-se que existe apenas um ponto (ponto 21) fora do limite na carta de controlo de médias, este ponto deve-se a uma causa especial, provavelmente à elevada temperatura do metal injetado.

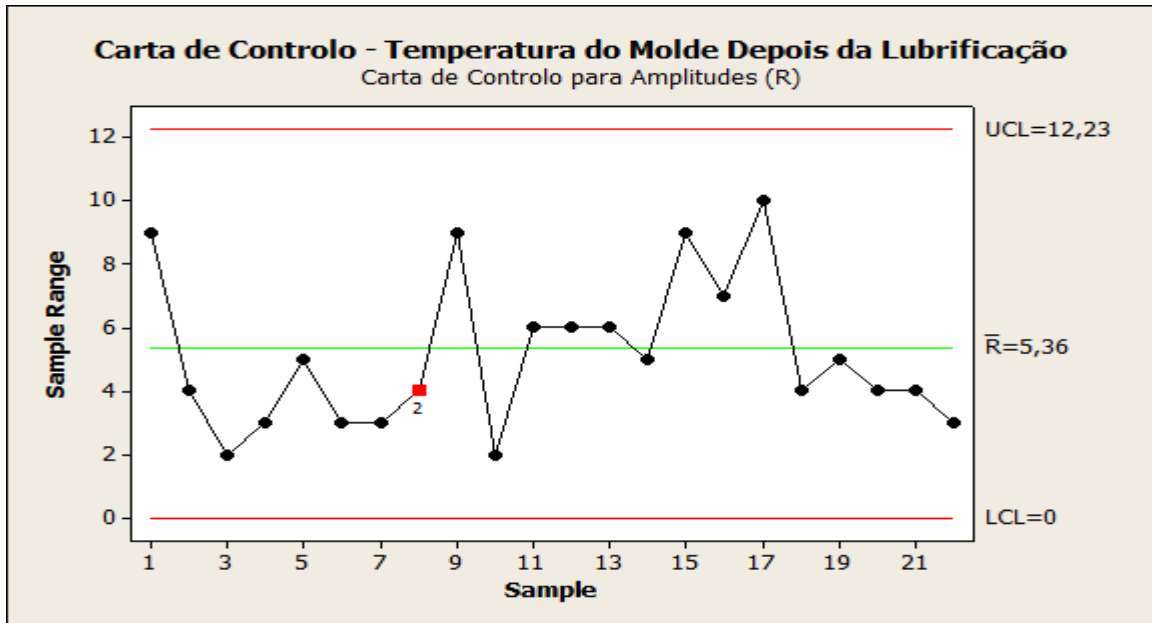


Figura 23 - Carta de controlo de amplitudes para a temperatura depois da lubrificação

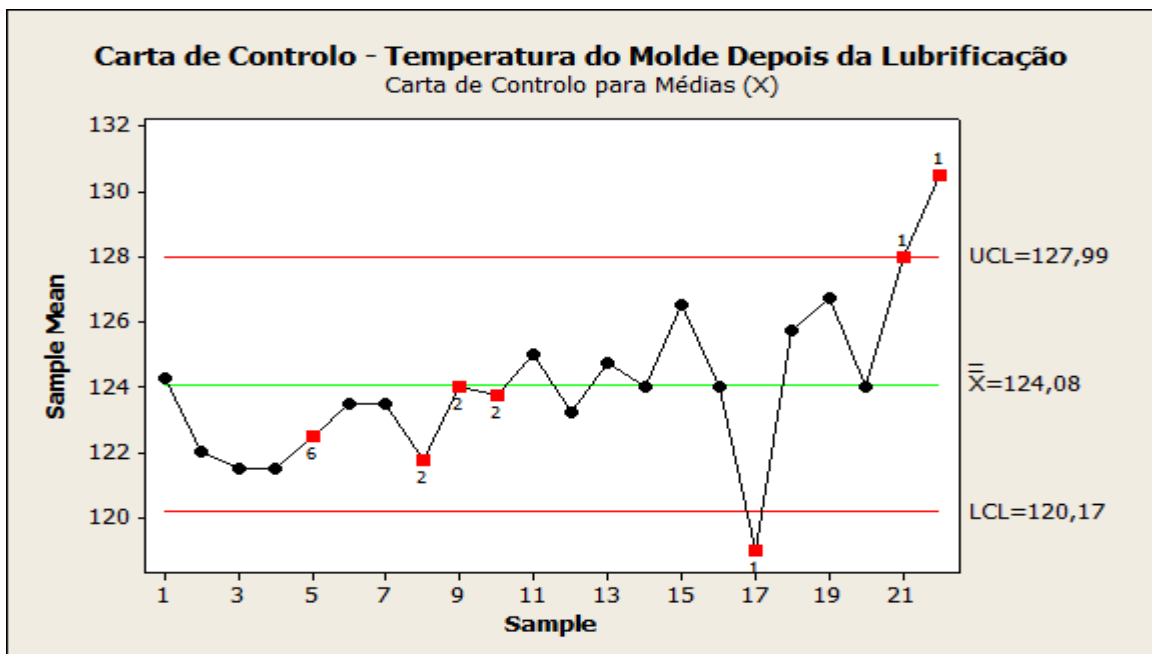


Figura 24 - Carta de controlo de médias para a temperatura depois da lubrificação

Pela observação das cartas de controlo da temperatura depois da lubrificação, concluiu-se que o processo está fora do controlo estatístico. A carta de amplitudes tem os pontos de 2 a 8 de

um lado da linha central (sintoma de processo fora de controlo). Observando a carta de médias, verificou-se que existe uma grande variabilidade, desde os pontos 21 e 22 que estão fora dos limites de controlo, a uma série de sintomas observados. Esta variabilidade, deveu-se provavelmente a não haver uma termorregulação do molde e ao sistema de lubrificação não ser o adequado ao molde em análise.

4 Identificação das variáveis com influência na qualidade das peças de fundição injetada.

A qualidade das peças de fundição injetada de alumínio está diretamente ligada com o aparecimento de defeitos provocados pelo processo de fundição. Para se obterem peças com a qualidade desejada é necessário reduzir a ocorrência desses defeitos.

Para identificar as causas, que influenciam a não qualidade das peças, procedeu-se a uma recolha e tratamento de dados. Depois de identificados os defeitos críticos, determinaram-se as variáveis do processo com influência na ocorrência desses defeitos. Finalmente, através de uma análise experimental, observou-se uma possível relação entre os defeitos críticos e as variáveis determinantes do processo.

A peça em análise foi o manípulo 30900-650.2, por ter sido a 1ª classificada entre as peças críticas.

4.1 Identificação dos defeitos críticos

Para identificar os defeitos críticos recolheram-se, aleatoriamente, 500 peças do supermercado (área de aprovisionamento de peças em bruto). Estas peças, de ordens de fabrico indeterminadas, foram depois pintadas pelo processo de pintura eletrostática a pó.

De seguida foi feita uma distinção entre as várias peças não conformes, separando as peças com defeitos de fundição (Tabela 4). No passo seguinte efetuou-se, uma análise de Pareto aos defeitos de fundição observados (Figura 25).

Tabela 4 -Defeitos críticos de fundição e suas % rejeição

| Defeitos(Defects) | nºdefeituosas | % defeituosas | % Defeitos de fundição |
|-------------------|---------------|---------------|------------------------|
| Poros | 43 | 8,6% | 82,7% |
| Juntas frias | 4 | 0,8% | 7,7% |
| Rechupes | 2 | 0,4% | 3,8% |
| Bolhas | 2 | 0,4% | 3,8% |
| Fissuras | 1 | 0,2% | 1,9% |
| Outros | 0 | 0,0% | 0,0% |
| Total | 52 | 10,4% | 100% |

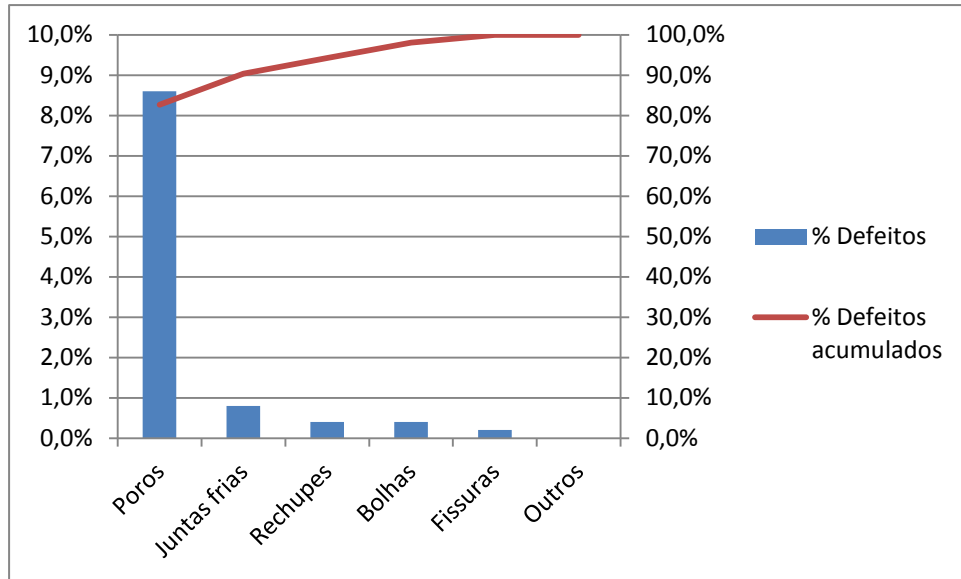


Figura 25 - Diagrama de Pareto para defeitos de fundição

Pela observação do diagrama de Pareto, constatou-se que o defeito crítico era a porosidade (presença de poros) (Figura 26), pois correspondia a 80% dos defeitos de fundição que provocaram a rejeição das peças, sendo que os outros defeitos tinham pouca influência na rejeição das peças fundidas.

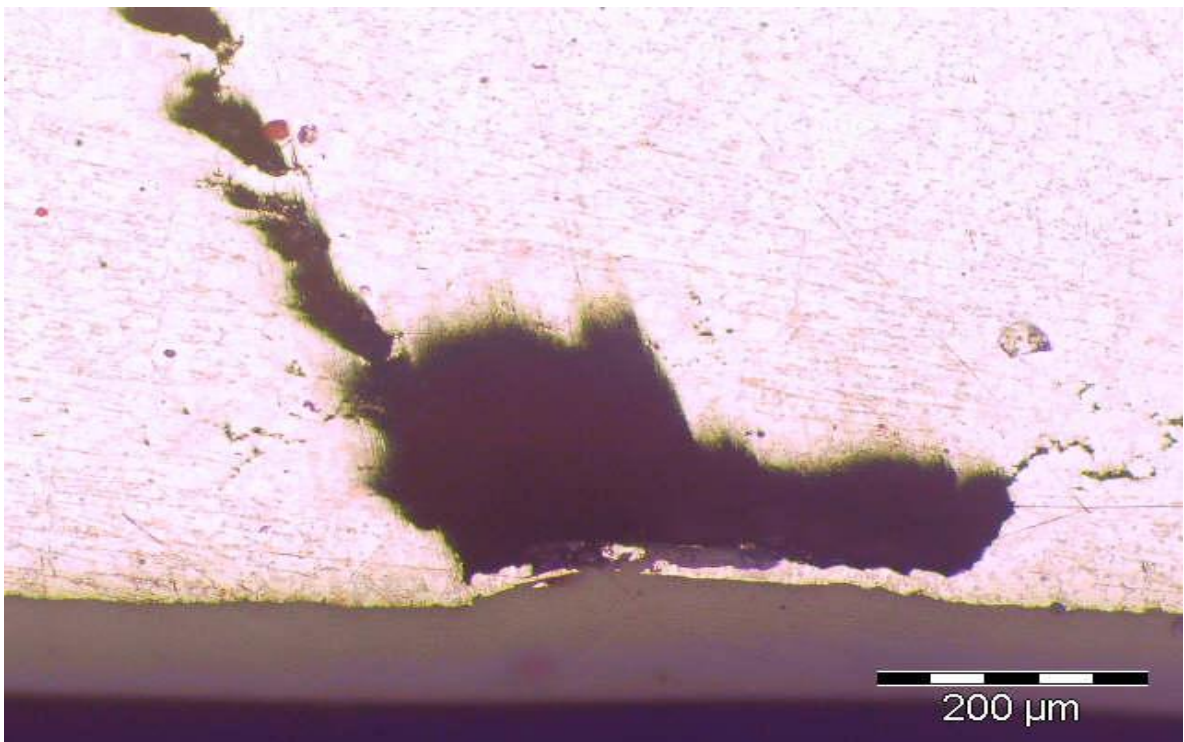


Figura 26 - Microfotografia de um poro

4.2 Determinação das causas dos defeitos críticos

Para se determinar as variáveis (causas) que influenciam a qualidade das peças injetadas, foi necessário determinar quais as causas dos defeitos de fundição que levaram à rejeição das peças. Como os poros foram o defeito de fundição que provocou maior rejeição nas peças (80 %), procedeu-se à determinação das causas (variáveis do processo) que provocam o aparecimento de poros. Elaborou-se então um diagrama de causa-efeito, para determinar que variáveis do processo promovem as origens dos poros (Figura 27).

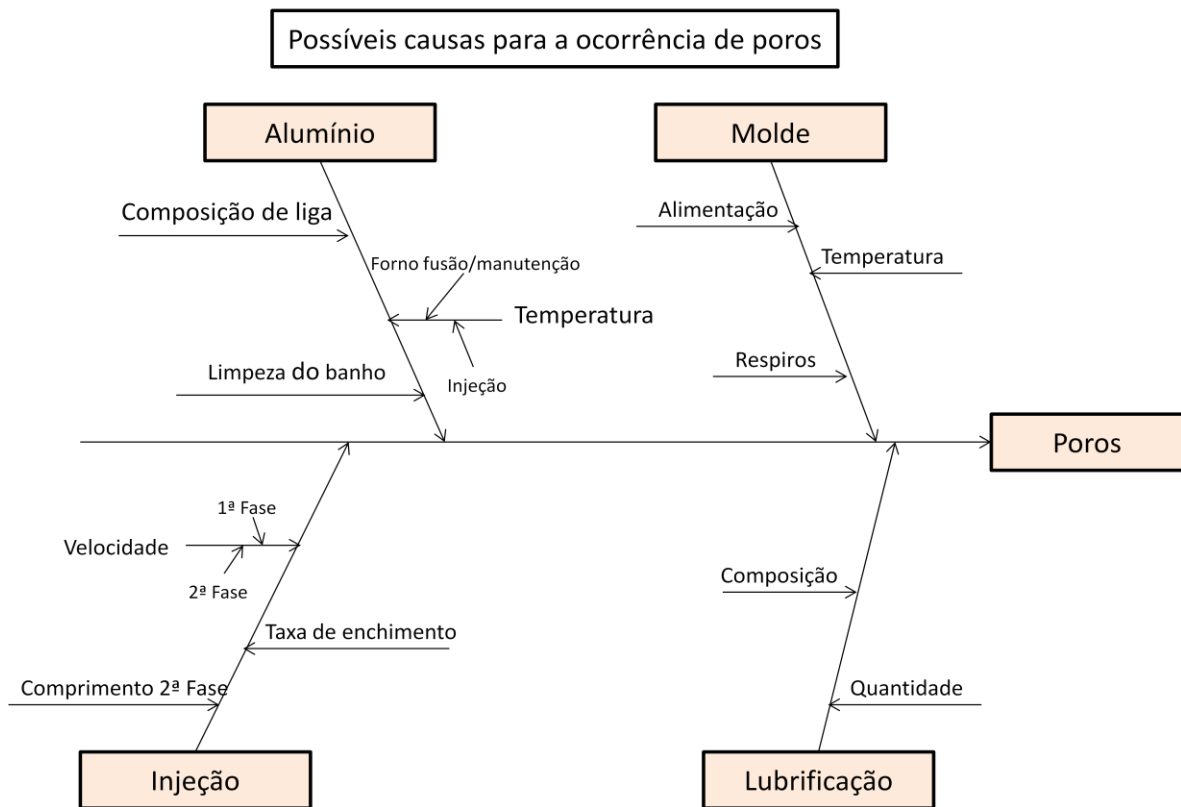


Figura 27 - Diagrama de causa-efeito com possíveis causas de ocorrência de poros

Causas da formação de poros:

- Aprisionamento de ar durante o enchimento do molde – o enchimento dos moldes de fundição injetada, por definição turbulento, provoca o aprisionamento de uma parte do ar inicialmente contido no molde. Esse aprisionamento é essencialmente condicionado pela conceção do sistema de alimentação e pela velocidade de injeção
- Aprisionamento de ar na camisa de injeção – o ar pode ficar ocluído no metal durante a primeira fase de injeção. Isto ocorre quando a velocidade de injeção da primeira fase não é a adequada ao diâmetro da camisa e à taxa de enchimento (uma taxa de enchimento baixa promove o aumento da quantidade de ar na camisa de injeção).
- Aprisionamento de gás proveniente do lubrificante – se o solvente do produto de lubrificação for vaporizado de forma incompleta ou decomposto aquando da chegada do metal ao molde. É uma inadaptação do lubrificante à temperatura de operação do molde ou uma pulverização abundante que provoca um abaixamento excessivo da

temperatura da cavidade do molde. Neste caso o alumínio reage com o excedente de solvente (água), formando hidrogénio.

- Libertação de gases dissolvidos no metal – o alumínio e suas ligas dissociam facilmente a água e os compostos de hidrogénio. O hidrogénio libertado durante essa dissociação é então dissolvido pelo metal líquido, aumentando estas quantidades com o aumento da temperatura. Como a solubilidade do hidrogénio no alumínio no estado sólido é quase nula, o hidrogénio dissolvido no metal é libertado durante a solidificação, devendo a temperatura no forno de manutenção ser tão baixa quanto o possível.
- Presença de óxidos no metal – promove a formação de gás por um fenómeno físico-químico complexo. Recomenda-se uma limpeza minuciosa do alumínio com o objetivo de remover a película de óxido e desgaseificar a liga. A eficácia da limpeza varia em função da temperatura do metal (forno de fusão).

4.3 Análise experimental

Esta análise experimental teve como objetivo observar a verdadeira relação entre o defeito crítico (poros) e as variáveis que influenciam a ocorrência desse mesmo defeito (e consequentemente a qualidade das peças de fundição injetada). Selecionaram-se 4 das variáveis identificadas anteriormente:

- Temperatura do forno de manutenção
- Velocidade de 1ª Fase
- Velocidade de 2ª Fase
- Comprimento de 2ª Fase

Estas variáveis foram as escolhidas, tendo em conta a maior facilidade em observar e variar os valores de cada uma delas a níveis diferentes.

Para se proceder à análise, retiraram-se 14 amostras de 50 peças, fazendo variar a níveis diferentes as 4 variáveis em cada amostra, recolhendo-se de seguida os dados sobre a rejeição (devido à presença de poros) em cada uma delas (Tabela 5 - Dados recolhidos da análise experimental).

Tabela 5 - Dados recolhidos da análise experimental

| Ensaio | % Defeituosas | Temperatura (°C) | Velocidade 1ªfase (%) | Velocidade 2ªfase (%) | Comprimento 2ªfase (mm) |
|--------|---------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 20 | 685 | 45 | 25 | 215 |
| 2 | 20 | 685 | 40 | 27 | 210 |
| 3 | 16 | 685 | 40 | 27 | 210 |
| 4 | 2 | 695 | 40 | 27 | 210 |
| 5 | 12 | 695 | 40 | 30 | 210 |
| 6 | 16 | 695 | 40 | 30 | 210 |
| 7 | 8 | 695 | 40 | 30 | 207 |
| 8 | 10 | 695 | 40 | 30 | 210 |
| 9 | 8 | 695 | 40 | 30 | 210 |
| 10 | 4 | 695 | 40 | 27 | 215 |
| 11 | 2 | 675 | 40 | 35 | 210 |
| 12 | 2 | 675 | 40 | 40 | 210 |
| 13 | 6 | 675 | 45 | 30 | 210 |
| 14 | 4 | 675 | 35 | 30 | 210 |

Procedeu-se em seguida à elaboração de diagramas de dispersão (Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31) , para observar uma possível relação entre as variáveis e a ocorrência do defeito crítico.

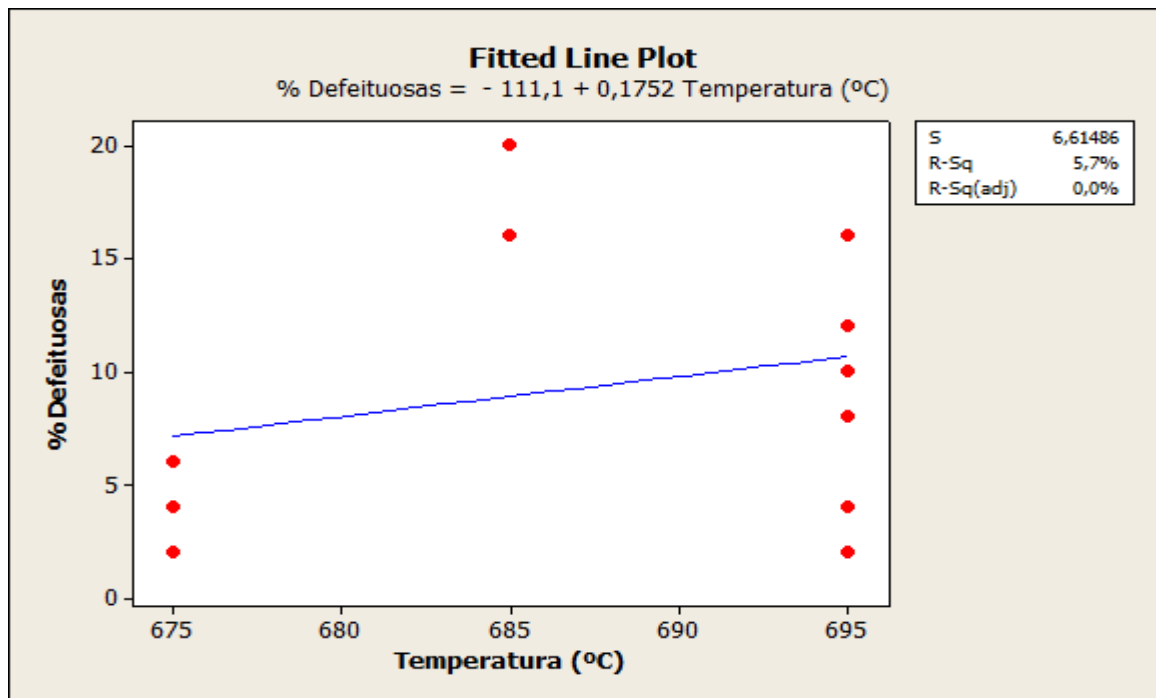


Figura 28 - Diagrama de dispersão Temperatura Vs % Defeituosas

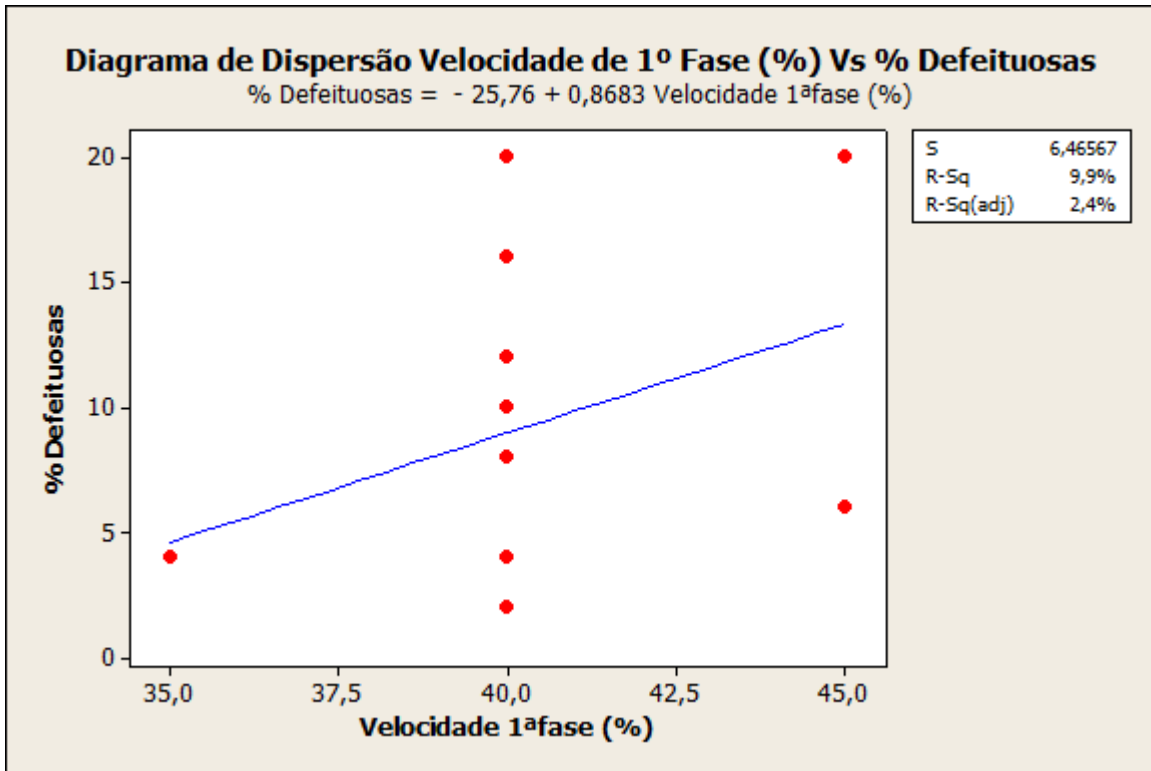


Figura 29 - Diagrama de dispersão de Velocidade de 1ª Fase Vs % Defeituosas

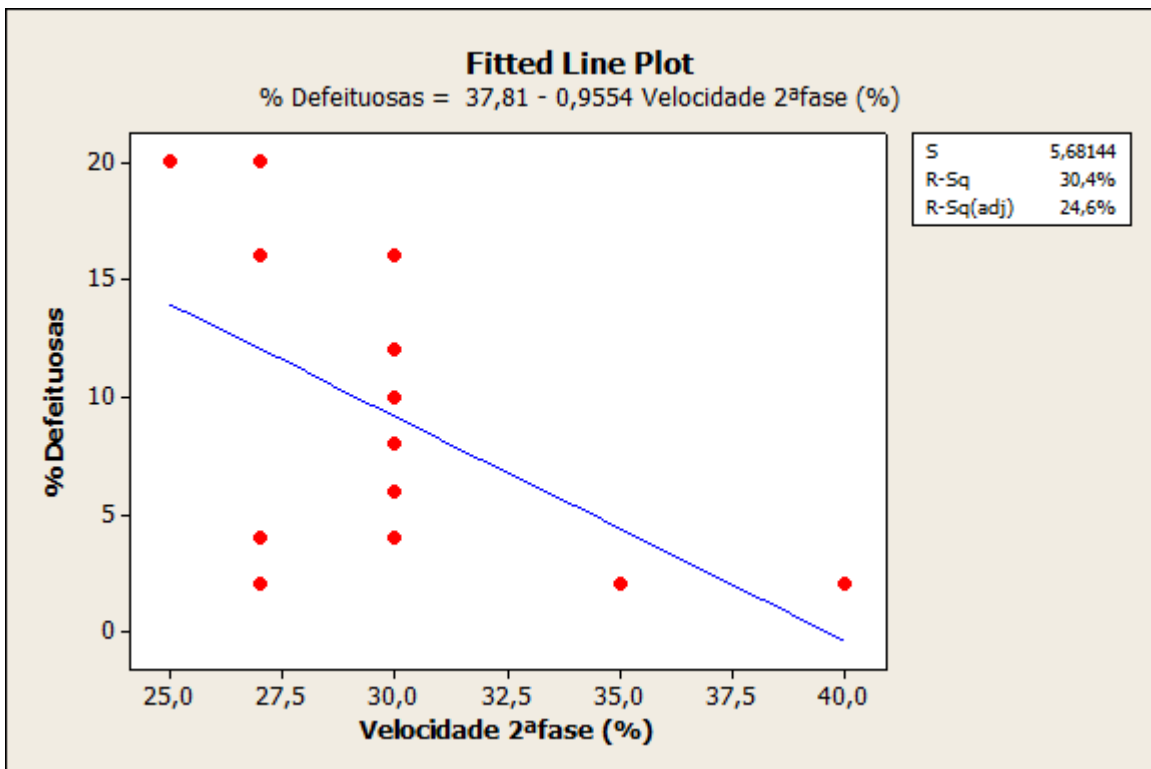


Figura 30 - Diagrama de dispersão de Velocidade 2ª Fase Vs % Defeituosas

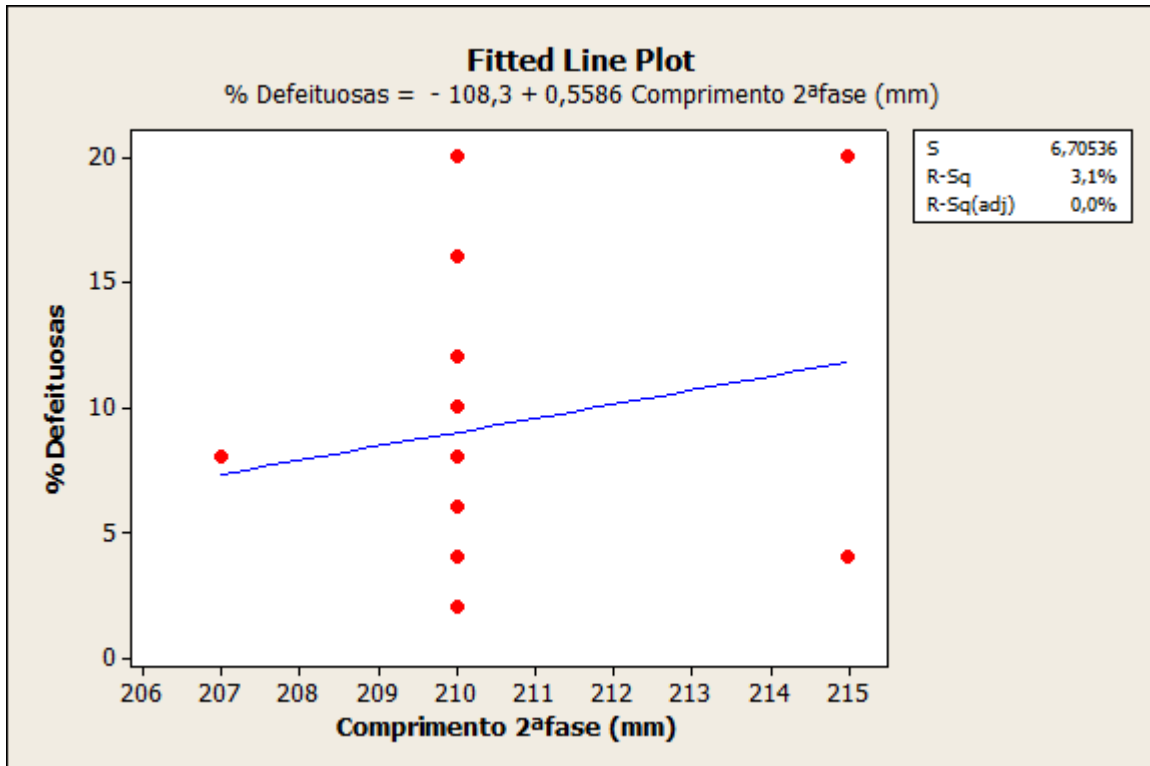


Figura 31 - Diagrama de dispersão comprimento de 2ª Fase Vs % Defeituosas

Pela observação dos gráficos e com a ajuda da reta de regressão, inferiu-se que:

- Temperatura Vs % Defeituosas – a correlação é positiva, com o aumento da temperatura, aumenta a % de Defeituosas;
- Velocidade 1ª Fase Vs % Defeituosas - a correlação é positiva, com o aumento da velocidade 1ª Fase, aumenta a % de Defeituosas;
- Velocidade 2ª Fase Vs % Defeituosas – a correlação é negativa, com o aumento da velocidade 2ª Fase, diminui a % de Defeituosas;
- Comprimento 2ª Fase Vs % Defeituosas - a correlação é positiva, com o aumento do comprimento de 2ª Fase, aumenta a % de Defeituosas.

Não se pode concluir que exista uma relação de causalidade entre as variáveis e a ocorrência de poros, apenas que pode haver uma possível relação entre elas. Só se pode dizer, que pode haver uma relação entre Temperaturas mais baixas, Velocidades de 1ª Fase mais baixas, Velocidades de 2ª Fase mais altas e Comprimentos de 2ª Fase mais curtos, com a diminuição de ocorrência de defeitos. Apesar de se observar uma tendência para cada uma das variáveis, essa tendência pode estar a ser causada por outra variável e não pelas variáveis em análise.

O número de amostras recolhidas foi muito reduzido para o efeito que se desejava, mas por questões do bom funcionamento da produção, foram as possíveis. Para que se possa retirar qualquer conclusão assertiva sobre a verdadeira relação entre as variáveis e o defeito crítico,

devem ser analisadas uma quantidade de amostras muito superior, realizando um desenho de experiências com base no Método de Taguchi e na ANOVA, pois só assim poderemos ter uma análise robusta e confiável.

4.4 Manual de suporte à decisão no chão de fábrica

Devido à elevada instabilidade no processo de fundição injetada de alumínio, decidiu-se elaborar um manual de suporte à decisão no chão de fábrica, com o intuito de proporcionar aos operários um mais célere e eficaz ajuste das variáveis do processo de fundição injetada de alumínio.

Como o defeito crítico principal detetado é a porosidade, apresentam-se as condições de controlo do processo nas variáveis com influência direta (Figura 32).



| | Variável | Condição de Controlo |
|--|--|--|
| P O R O S I D A D E | Velocidade de 2 ^o fase | Ajustar velocidade de 2 ^a Fase |
| | Comprimento de 2 ^a fase | Ajustar o comprimento de 2 ^a Fase |
| | Temperatura forno de manutenção | Diminuir a temperatura do forno de manutenção para a temperatura mais baixa possível |
| | Problemas de lubrificação | Reduzir o desmoldante se molde demasiado frio ou desmoldante em excesso: - Reduzir o caudal de desmoldante - Reduzir os tempos de aplicação do desmoldante - Diminuir a concentração do desmoldante (atenção às instruções do fornecedor) |
| | Velocidade de 1 ^a fase mal ajustada | Velocidade da 1 ^a fase próxima da velocidade crítica |
| | Taxa de enchimento baixa | Colocar a taxa de enchimento entre 60%-80% Aumentar a quantidade de metal a injetar, aumentando a espessura da bolacha. |




Figura 32 - Manual de suporte à decisão no chão de fábrica- porosidade

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

O trabalho desenvolvido, no decorrer da realização deste projeto, foi de extrema importância para o autor porque possibilitou a aquisição de conhecimento e experiência em ambiente industrial.

Permitiu observar e vivenciar os problemas e aprender a forma de lidar com eles, proporcionando ao mesmo tempo um conhecimento amplo sobre a organização e funcionamento do chão de fábrica, vivenciando os constrangimentos do dia-a-dia de uma empresa para os quais é necessário encontrar soluções.

Para a STA, o projeto desenvolvido, permitiu a aquisição de um conhecimento mais aprofundado sobre o processo de fundição injetada de alumínio a nível da instabilidade do processo, das variáveis mais importantes e das fragilidades de alguns equipamentos do processo.

O projeto desenvolvido teve o objetivo de analisar e estabilizar o processo de fundição injetada de alumínio para minimizar a rejeição no produto, tendo obtido as seguintes conclusões:

- A peça crítica (peça com maior rejeição), é o manípulo 30900-650.2, pelo que é nessa peça e respetivo molde que se devem dirigir as atenções para melhorias do processo;
- São muitas as variáveis que influenciam a qualidade das peças fundidas, sendo relacionadas maioritariamente com o alumínio, o molde, a injeção e a lubrificação. As variáveis não influenciam por si só, mas pela conjugação entre elas;
- O processo de fundição injetada não se encontra em controlo estatístico. Observou-se uma enorme variação em características de qualidade do processo, como a taxa de enchimento e a temperatura do molde. A taxa de enchimento era em média de 50.55%, quando deveria ser entre 60% e 80%.
- Os poros são o defeito de fundição que mais peças defeituosas provoca, pelo que se deve atuar nas variáveis que promovem a forma de os originar: o aprisionamento de ar durante o enchimento do molde; o aprisionamento de ar na camisa de injeção; o aprisionamento de gás proveniente da lubrificação; libertação de gases dissolvidos no metal; a presença de óxidos no metal.
- Da análise experimental, não se retiraram conclusões consistentes de causalidade entre as variáveis testadas e a rejeição de peças. Observa-se apenas, uma possível relação entre a diminuição da temperatura, a diminuição velocidade de 1ª fase, a diminuição do comprimento da 2ª fase e o aumento da velocidade de 2ª fase, com a diminuição de peças defeituosas provocadas pelo aparecimento de poros. Esta possível relação só pode ser observada individualmente para cada variável, sendo que a verdadeira relação pode ser causada por qualquer outro fator.

Elaborou-se um manual de suporte à decisão no chão de fábrica, com o objetivo de permitir um ajuste mais célere das variáveis de fundição, de modo a corrigir os problemas identificados nas peças fundidas. Visto o manual não ter sido implementado aquando do término do projeto, não se pode retirar qualquer conclusão acerca do seu desempenho.

As peças não conformes das amostras da análise experimental foram enviadas para observação e ensaios no INEGI, de modo a serem melhor identificadas as possíveis causas dos defeitos de fundição. Identificou-se que muitos dos defeitos ocorriam nas zonas de corte do gito (canal de alimentação, respiros e masselotes). À data do fim do projeto, ainda não estavam disponíveis as informações finais sobre esses ensaios.

Sugere-se que no futuro se proceda à alteração e melhoria em alguns equipamentos, visando diminuir a variabilidade do processo. Os moldes de fundição devem ter um sistema de termorregulação e deve-se implementar um novo sistema de lubrificação mais adequado aos moldes utilizados.

Recomenda-se a análise química ao metal fundido (proveniente de lingotes e reutilização do refugo de fundição) para averiguar a composição do alumínio a injetar.

Para a identificação da verdadeira relação das variáveis com o aparecimento de poros (defeito crítico), sugere-se a elaboração de um desenho de experiências baseado no Método de Taguchi e na ANOVA.

Bibliografia

- [1] – STA – Sociedade Transformadora de Alumínios, último acesso: dezembro 2012, <http://www.sofi.pt/>.
- [2] – Reikher, A., Barkhudarov, M. R. (2007), “Casting: An Analytical Approach“, Springer-Verlag, London.
- [3] – Andressen B. (2005), “Die Casting Engineering: Hydraulic, thermal and Mechanical Process”, Marcel Dekker, New York.
- [4] - “Aluminum Casting Technology”, 2nd Edition, The American Foundrymen’s Society, Inc.
- [5] – CINFU (2002), “Introdução à Fundição Injetada”.
- [6] – www.custompartnet.com, ultimo acesso: janeiro 2013.
- [7] – “Techniques de mesure et d’alimentation”, Buhler Druckguss.
- [8] – Ferreira, J.C. (1999), “Tecnologia da Fundição”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- [9] – Chiaverini, V. “Tecnologia Mecânica Vol. I: Estrutura e propriedades das ligas metálicas”,
- [10] – “Process Optimization”, Buhler Druckguss
- [11] – Montgomery, D.C. (2009), “Introduction to Statistical Quality Control”, Sixth Edition, John Wiley & Sons, Jefferson City
- [12] – Kiemele, M.J., Schmidt, S.R., Berdine, R.J. “Basic Statistics: Tools for continuous improvement”, Fourth Edition, Air Academy Press & Associates, LLC.
- [13] – Schmidt, S.R., Launsby, R.G., “Understanding Industrial Designed Experiments”, Fourth Edition, Air Academy Press & Associates, LLC.

ANEXO A: Fatores para a construção de cartas de controlo para variáveis

| Factors for Constructing Variables Control Charts | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Observations in Sample, <i>n</i> | Chart for Averages | | | Chart for Ranges | | | | |
| | Factors for Control Limits | | | Factors for Control Limits | | | | |
| | <i>A</i> | <i>A</i> ₂ | <i>A</i> ₃ | <i>d</i> ₃ | <i>D</i> ₁ | <i>D</i> ₂ | <i>D</i> ₃ | <i>D</i> ₄ |
| 2 | 2.121 | 1.880 | 2.659 | 0.853 | 0 | 3.686 | 0 | 3.267 |
| 3 | 1.732 | 1.023 | 1.954 | 0.888 | 0 | 4.358 | 0 | 2.574 |
| 4 | 1.500 | 0.729 | 1.628 | 0.880 | 0 | 4.698 | 0 | 2.282 |
| 5 | 1.342 | 0.577 | 1.427 | 0.864 | 0 | 4.918 | 0 | 2.114 |
| 6 | 1.225 | 0.483 | 1.287 | 0.848 | 0 | 5.078 | 0 | 2.004 |
| 7 | 1.134 | 0.419 | 1.182 | 0.833 | 0.204 | 5.204 | 0.076 | 1.924 |
| 8 | 1.061 | 0.373 | 1.099 | 0.820 | 0.388 | 5.306 | 0.136 | 1.864 |
| 9 | 1.000 | 0.337 | 1.032 | 0.808 | 0.547 | 5.393 | 0.184 | 1.816 |
| 10 | 0.949 | 0.308 | 0.975 | 0.797 | 0.687 | 5.469 | 0.223 | 1.777 |
| 11 | 0.905 | 0.285 | 0.927 | 0.787 | 0.811 | 5.535 | 0.256 | 1.744 |
| 12 | 0.866 | 0.266 | 0.886 | 0.778 | 0.922 | 5.594 | 0.283 | 1.717 |
| 13 | 0.832 | 0.249 | 0.850 | 0.770 | 1.025 | 5.647 | 0.307 | 1.693 |
| 14 | 0.802 | 0.235 | 0.817 | 0.763 | 1.118 | 5.696 | 0.328 | 1.672 |
| 15 | 0.775 | 0.223 | 0.789 | 0.756 | 1.203 | 5.741 | 0.347 | 1.653 |
| 16 | 0.750 | 0.212 | 0.763 | 0.750 | 1.282 | 5.782 | 0.363 | 1.637 |
| 17 | 0.728 | 0.203 | 0.739 | 0.744 | 1.356 | 5.820 | 0.378 | 1.622 |
| 18 | 0.707 | 0.194 | 0.718 | 0.739 | 1.424 | 5.856 | 0.391 | 1.608 |
| 19 | 0.688 | 0.187 | 0.698 | 0.734 | 1.487 | 5.891 | 0.403 | 1.597 |
| 20 | 0.671 | 0.180 | 0.680 | 0.729 | 1.549 | 5.921 | 0.415 | 1.585 |
| 21 | 0.655 | 0.173 | 0.663 | 0.724 | 1.605 | 5.951 | 0.425 | 1.575 |
| 22 | 0.640 | 0.167 | 0.647 | 0.720 | 1.659 | 5.979 | 0.434 | 1.566 |
| 23 | 0.626 | 0.162 | 0.633 | 0.716 | 1.710 | 6.006 | 0.443 | 1.557 |
| 24 | 0.612 | 0.157 | 0.619 | 0.712 | 1.759 | 6.031 | 0.451 | 1.548 |
| 25 | 0.600 | 0.153 | 0.606 | 0.708 | 1.806 | 6.056 | 0.459 | 1.541 |

ANEXO B: Dados históricos sobre a rejeição das peças lacadas

| Artigo | Descrição | Boas | Rejeitadas | Yield | % Rejeição (pelo total de peças) | Rank | Frequência | Acumulada |
|-------------|------------------------|---------|------------|--------|----------------------------------|------|------------|-----------|
| 2A0113 | MAN.30900-650.2 SA | 85.281 | 17.257 | 83% | 6,81% | 1 | 54,52% | 54,52% |
| 2A0043 | MAN.4000-217.2 SA | 16.982 | 2.118 | 89% | 0,84% | 2 | 6,69% | 61,21% |
| 2A0055 | MAN.4000-219.2 SA | 14.368 | 2.031 | 88% | 0,80% | 3 | 6,42% | 67,63% |
| 2A0098 | MAN.11330/2 SA | 18.542 | 1.949 | 90% | 0,77% | 4 | 6,16% | 73,78% |
| 2A0072 | MAN.11211/1 SA | 2.900 | 1.267 | 70% | 0,50% | 5 | 4,00% | 77,79% |
| 2A0006 | MAN.7745.1 SA | 26.726 | 1.262 | 95% | 0,50% | 6 | 3,99% | 81,77% |
| 2A0068 | MAN.10784/1 SA | 6.424 | 1.086 | 86% | 0,43% | 7 | 3,43% | 85,21% |
| 2A0003 | MAN.9516 SA | 22.885 | 965 | 96% | 0,38% | 8 | 3,05% | 88,25% |
| 2A0115 | MAN.30900-650.2 CYL SA | 4.900 | 896 | 85% | 0,35% | 9 | 2,83% | 91,08% |
| 2A0064 | BATENTE 6500AD SA | 6.311 | 427 | 94% | 0,17% | 10 | 1,35% | 92,43% |
| 2A0044 | MAN.823AD/1.2 SA | 3.060 | 394 | 89% | 0,16% | 11 | 1,24% | 93,68% |
| 2A0095 | MAN.11351/2 SA | 2.501 | 390 | 87% | 0,15% | 12 | 1,23% | 94,91% |
| 2A0110 | MAN.4000-217.2 CYL SA | 1.060 | 271 | 80% | 0,11% | 13 | 0,86% | 95,77% |
| 2A0116 | MAN.11211/2 SA | 580 | 257 | 69% | 0,10% | 14 | 0,81% | 96,58% |
| 2A0111 | MAN.4000-219.2 CYL SA | 2.392 | 230 | 91% | 0,09% | 15 | 0,73% | 97,31% |
| 2A0094 | MAN.822/1.2AD SA | 620 | 192 | 76% | 0,08% | 16 | 0,61% | 97,91% |
| 2A0079 | MAN.11239/1 SA | 566 | 109 | 84% | 0,04% | 17 | 0,34% | 98,26% |
| 2A0038 | MAN.10719 SA | 721 | 102 | 88% | 0,04% | 18 | 0,32% | 98,58% |
| 2A0096 | MAN.11328/2 SA | 583 | 98 | 86% | 0,04% | 19 | 0,31% | 98,89% |
| 2A0104 | MAN.11372/1 SA | 580 | 87 | 87% | 0,03% | 20 | 0,27% | 99,16% |
| 2A0087 | MAN.11315/1 SA | 1.412 | 62 | 96% | 0,02% | 21 | 0,20% | 99,36% |
| 2A0097 | MAN.11329/2 SA | 218 | 52 | 81% | 0,02% | 22 | 0,16% | 99,52% |
| 2A0047 | MAN.10273/1.9 SA | 106 | 42 | 72% | 0,02% | 23 | 0,13% | 99,66% |
| 2A0080 | MAN.10375/1 SA | 220 | 36 | 86% | 0,01% | 24 | 0,11% | 99,77% |
| 2A0009 | MAN.7918 SA | 250 | 25 | 91% | 0,01% | 25 | 0,08% | 99,85% |
| 2A0070 | MAN.ESQ.8954 SA | 100 | 11 | 90% | 0,00% | 26 | 0,03% | 99,88% |
| 2A0049 | MAN.10273/1.14 SA | 54 | 6 | 90% | 0,00% | 27 | 0,02% | 99,90% |
| 2A0081 | MAN.11218/3.1 SA | 228 | 6 | 97% | 0,00% | 27 | 0,02% | 99,92% |
| 2A0101 | MAN.11404/2 SA | 310 | 6 | 98% | 0,00% | 27 | 0,02% | 99,94% |
| 2A0106 | ESP.11218/2.1 SA | 222 | 6 | 97% | 0,00% | 27 | 0,02% | 99,96% |
| 2A0010 | CORPO 7919 SA | 250 | 5 | 98% | 0,00% | 31 | 0,02% | 99,97% |
| 2A0085 | ESP.11221/1.1 SA | 210 | 5 | 98% | 0,00% | 31 | 0,02% | 99,99% |
| 2A0099 | MAN.11350/2 SA | 40 | 3 | 93% | 0,00% | 33 | 0,01% | 100,00% |
| 2A0011 | BASE 8966 SA | 110 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0056 | MAN.10258/1.9 SA | 1 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0066 | MAN.10273/1.19 SA | 2 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0069 | MAN.DIR.8955 SA | 10 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0082 | ESP.11218/1.1 SA | 12 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0084 | ESP.11221/1.2 SA | 1 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0100 | MAN.11351/2.1 SA | 55 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0103 | MANIPULO 11407/2 SA | 130 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| 2A0105 | ESP.11218/2.2 SA | 1 | 0 | 100% | 0,00% | 34 | 0,00% | 100,00% |
| Total | | 221.924 | 31.653 | 87,52% | 12,48% | | | |
| TOTAL PEÇAS | | 253.577 | | | | | | |

ANEXO C: Dados recolhidos aos valores da taxa de enchimento

| Ensaio | Peça | Peso do gito (g) | Vol. Metal vazado(cm3) | Taxa de enchimento (%) |
|--------|------|------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 1 | 1243,45 | 469,2264151 | 50,29% |
| | 2 | 1231 | 464,5283019 | 49,79% |
| | 3 | 1234,7 | 465,9245283 | 49,94% |
| | 4 | 1231 | 464,5283019 | 49,79% |
| 2 | 1 | 1235,55 | 466,245283 | 49,97% |
| | 2 | 1231,3 | 464,6415094 | 49,80% |
| | 3 | 1246,65 | 470,4339623 | 50,42% |
| | 4 | 1238,7 | 467,4339623 | 50,10% |
| 3 | 1 | 1278,45 | 482,4339623 | 51,70% |
| | 2 | 1296,8 | 489,3584906 | 52,45% |
| | 3 | 1284,15 | 484,5849057 | 51,94% |
| | 4 | 1272,7 | 480,2641509 | 51,47% |
| 4 | 1 | 1256,35 | 474,0943396 | 50,81% |
| | 2 | 1244,95 | 469,7924528 | 50,35% |
| | 3 | 1250,75 | 471,9811321 | 50,58% |
| | 4 | 1264,7 | 477,245283 | 51,15% |
| 5 | 1 | 1244,1 | 469,4716981 | 50,32% |
| | 2 | 1209,3 | 456,3396226 | 48,91% |
| | 3 | 1227,2 | 463,0943396 | 49,63% |
| | 4 | 1244,95 | 469,7924528 | 50,35% |
| 6 | 1 | 1211,55 | 457,1886792 | 49,00% |
| | 2 | 1246,1 | 470,2264151 | 50,40% |
| | 3 | 1248,3 | 471,0566038 | 50,49% |
| | 4 | 1215 | 458,490566 | 49,14% |
| 7 | 1 | 1281,15 | 483,4528302 | 51,81% |
| | 2 | 1294,6 | 488,5283019 | 52,36% |
| | 3 | 1268,1 | 478,5283019 | 51,29% |
| | 4 | 1261,9 | 476,1886792 | 51,04% |
| 8 | 1 | 1253,75 | 473,1132075 | 50,71% |
| | 2 | 1253,7 | 473,0943396 | 50,70% |
| | 3 | 1216,4 | 459,0188679 | 49,20% |
| | 4 | 1241,4 | 468,4528302 | 50,21% |
| 9 | 1 | 1233,95 | 465,6415094 | 49,91% |
| | 2 | 1213,1 | 457,7735849 | 49,06% |
| | 3 | 1261,15 | 475,9056604 | 51,01% |
| | 4 | 1252,35 | 472,5849057 | 50,65% |
| 10 | 1 | 1148,8 | 433,509434 | 46,46% |
| | 2 | 1250,35 | 471,8301887 | 50,57% |
| | 3 | 1227,5 | 463,2075472 | 49,64% |
| | 4 | 1243,95 | 469,4150943 | 50,31% |
| 11 | 1 | 1259,35 | 475,2264151 | 50,93% |
| | 2 | 1279,25 | 482,7358491 | 51,74% |
| | 3 | 1263,15 | 476,6603774 | 51,09% |
| | 4 | 1221,1 | 460,7924528 | 49,39% |
| 12 | 1 | 1272,9 | 480,3396226 | 51,48% |
| | 2 | 1276,65 | 481,754717 | 51,63% |
| | 3 | 1268,7 | 478,754717 | 51,31% |
| | 4 | 1232,9 | 465,245283 | 49,86% |
| 13 | 1 | 1287,05 | 485,6792453 | 52,05% |
| | 2 | 1258,8 | 475,0188679 | 50,91% |
| | 3 | 1281,6 | 483,6226415 | 51,83% |
| | 4 | 1275,9 | 481,4716981 | 51,60% |
| 14 | 1 | 1263,25 | 476,6981132 | 51,09% |
| | 2 | 1261,85 | 476,1698113 | 51,03% |
| | 3 | 1248,55 | 471,1509434 | 50,50% |
| | 4 | 1253,05 | 472,8490566 | 50,68% |
| 15 | 1 | 1239,7 | 467,8113208 | 50,14% |
| | 2 | 1225,85 | 462,5849057 | 49,58% |
| | 3 | 1225,95 | 462,6226415 | 49,58% |
| | 4 | 1222,7 | 461,3962264 | 49,45% |
| 16 | 1 | 1279,85 | 482,9622642 | 51,76% |
| | 2 | 1275 | 481,1320755 | 51,57% |
| | 3 | 1246,3 | 470,3018868 | 50,40% |
| | 4 | 1245,4 | 469,9622642 | 50,37% |
| 17 | 1 | 1222,05 | 461,1509434 | 49,42% |
| | 2 | 1192,7 | 450,0754717 | 48,24% |
| | 3 | 1205,15 | 454,7735849 | 48,74% |
| | 4 | 1182,6 | 446,2641509 | 47,83% |
| 18 | 1 | 1264,2 | 477,0566038 | 51,13% |
| | 2 | 1287,55 | 485,8679245 | 52,07% |
| | 3 | 1251,15 | 472,1320755 | 50,60% |
| | 4 | 1269,05 | 478,8867925 | 51,32% |
| 19 | 1 | 1369,05 | 516,6226415 | 55,37% |
| | 2 | 1336,7 | 504,4150943 | 54,06% |
| | 3 | 1368 | 516,2264151 | 55,33% |
| | 4 | 1350,2 | 509,509434 | 54,61% |
| 20 | 1 | 1219,1 | 460,0377358 | 49,30% |
| | 2 | 1241,35 | 468,4339623 | 50,20% |
| | 3 | 1224,95 | 462,245283 | 49,54% |
| | 4 | 1256,75 | 474,245283 | 50,83% |
| 21 | 1 | 1227,75 | 463,3018868 | 49,65% |
| | 2 | 1234,35 | 465,7924528 | 49,92% |
| | 3 | 1239,9 | 467,8867925 | 50,15% |
| | 4 | 1217,9 | 459,5849057 | 49,26% |
| 22 | 1 | 1231,75 | 464,8113208 | 49,82% |
| | 2 | 1222,6 | 461,3584906 | 49,45% |
| | 3 | 1225,45 | 462,4339623 | 49,56% |
| | 4 | 1208,95 | 456,2075472 | 48,89% |
| 23 | 1 | 1220,25 | 460,4716981 | 49,35% |
| | 2 | 1237,9 | 467,1320755 | 50,06% |
| | 3 | 1239,7 | 467,8113208 | 50,14% |
| | 4 | 1249,6 | 471,5471698 | 50,54% |
| 24 | 1 | 1210,8 | 456,9056604 | 48,97% |
| | 2 | 1261,3 | 475,9622642 | 51,01% |
| | 3 | 1264,3 | 477,0943396 | 51,13% |
| | 4 | 1256,8 | 474,2641509 | 50,83% |
| 25 | 1 | 1207,05 | 455,490566 | 48,82% |
| | 2 | 1293,05 | 487,9433962 | 52,30% |
| | 3 | 1279,8 | 482,9433962 | 51,76% |
| | 4 | 1276,95 | 481,8679245 | 51,64% |

ANEXO D: Valores das temperaturas do molde antes e depois da lubrificação

| Ensaio | Temperaturas | | | | | | | | | |
|--------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|--------------------|------------|
| | T1 (°C) | | T2 (°C) | | T3 (°C) | | T4 (°C) | | Média Temperaturas | |
| | antes lub | depois lub | antes lub | depois lub | antes lub | depois lub | antes lub | depois lub | antes lub | depois lub |
| 1 | 191 | 122 | 190 | 124 | 200 | 121 | 197 | 130 | 194,5 | 124,25 |
| 2 | 193 | 120 | 200 | 124 | 199 | 121 | 202 | 123 | 198,5 | 122 |
| 3 | 194 | 120 | 190 | 122 | 194 | 122 | 198 | 122 | 194 | 121,5 |
| 4 | 194 | 123 | 189 | 122 | 200 | 120 | 201 | 121 | 196 | 121,5 |
| 5 | 193 | 124 | 192 | 123 | 199 | 124 | 202 | 119 | 196,5 | 122,5 |
| 6 | 198 | 125 | 195 | 124 | 201 | 123 | 202 | 122 | 199 | 123,5 |
| 7 | 202 | 125 | 191 | 122 | 192 | 124 | 198 | 123 | 195,75 | 123,5 |
| 8 | 193 | 124 | 189 | 122 | 193 | 120 | 198 | 121 | 193,25 | 121,75 |
| 9 | 197 | 122 | 192 | 128 | 210 | 127 | 195 | 119 | 198,5 | 124 |
| 10 | 191 | 123 | 193 | 125 | 197 | 124 | 194 | 123 | 193,75 | 123,75 |
| 11 | 198 | 127 | 192 | 121 | 199 | 127 | 202 | 125 | 197,75 | 125 |
| 12 | 193 | 121 | 191 | 121 | 202 | 127 | 193 | 124 | 194,75 | 123,25 |
| 13 | 199 | 127 | 192 | 122 | 205 | 128 | 193 | 122 | 197,25 | 124,75 |
| 14 | 191 | 122 | 197 | 123 | 202 | 124 | 202 | 127 | 198 | 124 |
| 15 | 194 | 121 | 193 | 130 | 202 | 128 | 198 | 127 | 196,75 | 126,5 |
| 16 | 195 | 122 | 196 | 127 | 201 | 127 | 199 | 120 | 197,75 | 124 |
| 17 | 182 | 115 | 183 | 125 | 198 | 118 | 191 | 118 | 188,5 | 119 |
| 18 | 194 | 126 | 193 | 124 | 197 | 128 | 200 | 125 | 196 | 125,75 |
| 19 | 202 | 129 | 199 | 125 | 200 | 129 | 202 | 124 | 200,75 | 126,75 |
| 20 | 193 | 122 | 197 | 125 | 193 | 126 | 199 | 123 | 195,5 | 124 |
| 21 | 200 | 127 | 200 | 126 | 211 | 130 | 205 | 129 | 204 | 128 |
| 22 | 195 | 130 | 198 | 132 | 203 | 131 | 202 | 129 | 199,5 | 130,5 |