

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIELLA ONILA DO NASCIMENTO SOARES

**EMPREGO DA METODOLOGIA WCM NA ANÁLISE DE DEFEITO DO
PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

BELO HORIZONTE

2018

GABRIELLA ONILA DO NASCIMENTO SOARES

**EMPREGO DA METODOLOGIA WCM NA ANÁLISE DE DEFEITO DO
PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^a. Dra. Aline Bruna da Silva

Belo Horizonte

2018

GABRIELLA ONILA DO NASCIMENTO SOARES

**EMPREGO DA METODOLOGIA WCM NA ANÁLISE DE DEFEITO DO
PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia de Materiais.

Apresentado em: 20/06/2018

BANCA EXAMINADORA

.....
(Prof^ª. Dr. Aline Bruna da Silva)

.....
(Prof. Dr. Marcello Dumont)

.....
(Prof. Me. João Bosco dos Santos)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Cícero e Lucinéia, pois foram os primeiros a acreditar. Eles são os verdadeiros vencedores de qualquer conquista minha.

À meu irmão Gabriel, pelo companheirismo inigualável e recôndido.

Ao meu namorado Davi, que me acompanhou literalmente por toda trajetória acadêmica, sendo meu alicerce ao longo dos últimos anos.

Aos meus bons amigos, nunca secretos secretíssimos.

À minha família, por fazer parte de minha vida.

Aos meus colegas no trabalho, por todo apoio ao projeto e à vida profissional.

À empresa na qual realizei o estágio, por ter aberto as portas.

À minha orientadora Dr^a Aline Bruna, pela parceria em vários projetos.

E mais importante, a Deus por ser a luz em meu caminho.

RESUMO

O processo de moldagem por injeção de termoplásticos se destaca dos demais processos de conformação em virtude de suas inúmeras vantagens, dentre as quais pode-se ressaltar a elevada produtividade, excelente acabamento, versatilidade para moldagem de peças com formato e tamanho variado, características compatíveis com a demanda do atual mercado consumidor. Neste contexto, tem-se os moldados destinados à iluminação automotiva que possuem requisitos específicos que devem ser atendidos, principalmente com relação ao aspecto estético. Dessa forma, o presente trabalho retrata um estudo de um defeito que ocorre durante a injeção de um componente de um farol. Para tanto, foram realizadas análises seguindo metodologia *World Class Manufacturing* (WCM) e a simulação computacional utilizando o software Moldflow para identificação e resolução do problema. Os resultados revelaram que o defeito é decorrente de uma refrigeração deficiente do molde e que complexidade da geometria da peça também propicia a formação do defeito. Em decorrência destas análises, foi proposto modificações para melhorar a eficiência na circulação de água e o controle da temperatura na região.

Palavras-chave: Moldagem por Injeção, Simulação Computacional, WCM.

ABSTRACT

The plastic injection molding process stand out of the processes of conforming due to advantages, among them, it is possible to emphasize the high productivity, excellent finishing, versatility for molding pieces with varied format and size, characteristics compatible with the demand of the current consumer market. In this context, were molded parts for the automotive lighting industry that have specific requirements that must be met, especially with regard to the aesthetic aspect. In this way, the present work portrays a study of a defect that occurs during the component injection of a headlamp. For this, analyzes were performed following World Class Manufacturing (WCM) methodology and computational simulation using Moldflow software to identify and solve the problem. The results revealed that the defect is due to poor mold cooling and that the geometry complexity also leads to defect formation. As a result of these analyzes, modifications were proposed to improve water circulation efficiency and temperature control in the region.

Keywords: Injection Molding, Computational Simulation, WCM.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DA MÁQUINA DE INJEÇÃO	16
FIGURA 2 - PRESSÃO NA CAVIDADE DO MOLDE X TEMPO.....	18
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE INJEÇÃO	18
FIGURA 4 - FLUXO EM CHAFARIZ	20
FIGURA 5 - PROCESSO DE BI-INJEÇÃO ATRAVÉS DE MOLDE COM PLACA ROTATIVA.....	23
FIGURA 6 - DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO	27
FIGURA 7 - SEQUÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO, SEGUINDO A METODOLOGIA DE RUBRICH, WATSON E FAYAD (2015).....	28
FIGURA 8 - PASSOS PARA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL	30
FIGURA 9 - AMOSTRA PC LEXAN + 3% MASTER	34
FIGURA 10 - GRÁFICO DE PEÇAS REFUGADAS COM DEFEITO DE BOLHA DE INJEÇÃO.....	36
FIGURA 11 – BOLHA DE INJEÇÃO DO PROJETO GX-65.....	37
FIGURA 12 - COMPETÊNCIAS INDIVIDUAIS E GERAL DA EQUIPE	39
FIGURA 13 - SEQUÊNCIA DA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL.....	40
FIGURA 14 - REGIÃO DE FORMAÇÃO DA BOLHA	41
FIGURA 15 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA	42
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DO PARÂMETRO DE TEMPO DE INJEÇÃO DO CANHÃO 1.....	45
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE INJEÇÃO DO CANHÃO 2	46
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE CICLO	48
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO DA REGIÃO DE FORMAÇÃO DA BOLHA NO MOLDFLOW	50
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA APÓS ANÁLISES	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - METODOLOGIA 5G.....	26
TABELA 2 - ESTRUTURAÇÃO DO 5W1H.....	27
TABELA 3 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE COMPETÊNCIAS.....	29
TABELA 4 - PARÂMETROS DE INJEÇÃO	30
TABELA 5 - ESCALA DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO PROCESSO PRODUTIVO	33
TABELA 6 - RESUMO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 5G	41
TABELA 7 - TEMPERATURA DOS TERMORREGULADORES CONFORME O PROJETO	43
TABELA 8 - TEMPERATURA DOS TERMORREGULADORES.....	43
TABELA 9 - ENTRADA DOS VALORES DE TEMPO DE INJEÇÃO DO CANHÃO 1	43
TABELA 10 - ENTRADA DOS VALORES DE TEMPO DE INJEÇÃO CANHÃO 2.....	45
TABELA 11 - ENTRADA DOS VALORES DE TEMPO DE CICLO	47

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO	32
EQUAÇÃO 2 - CÁLCULO DO CP	32
EQUAÇÃO 3 - DETERMINAÇÃO DO CPKI.....	33
EQUAÇÃO 4 - DETERMINAÇÃO DO CPKS	33
EQUAÇÃO 5 - PORCENTAGEM DE PERDA DE ÁGUA	35
EQUAÇÃO 6 - DETERMINAÇÃO DE CPKI	44
EQUAÇÃO 7 - DETERMINAÇÃO DE CPKS	44
EQUAÇÃO 8 - DETERMINAÇÃO DE CPKI.....	46
EQUAÇÃO 9 - DETERMINAÇÃO DE CPKS	46
EQUAÇÃO 10 - DETERMINAÇÃO DE CPKI.....	47
EQUAÇÃO 11 - DETERMINAÇÃO DE CPKS	47
EQUAÇÃO 12 - DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DE PERDA DE ÁGUA PARA O PC PURO	49
EQUAÇÃO 13 - DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DE PERDA DE ÁGUA PARA PC + 3% MÁSTER	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE - *Computer – Aided Engineering*

CMM - Máquina de Medição de Coordenadas

DOE - Design of Experiments

PC - Policarbonato

WCM - World Class Manufacturing

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DOS POLÍMEROS	16
3.2 CICLO DE INJEÇÃO	17
3.3 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS POLÍMEROS	19
3.4 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DURANTE O PROCESSO	19
3.5 PARÂMETROS DE PROCESSO <i>VERSUS</i> PROBLEMAS DE INJEÇÃO.....	21
3.6 BI-INJEÇÃO.....	22
3.7 MÉTODOS DE ANÁLISE	23
3.7.1 <i>Simulação Computacional</i>	23
3.7.2 <i>WCM e as Ferramentas de Qualidade</i>	25
4. METODOLOGIA.....	28
4.1 SELEÇÃO DO PROBLEMA.....	29
4.2 DEFINIÇÃO DO TIME.....	29
4.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	30
4.4 ESTUDO DO SISTEMA	31
4.4.1 <i>Avaliação da Máquina / Molde</i>	31
4.4.2 <i>Avaliação da Matéria-Prima</i>	34
4.4.3 <i>Avaliação da Mão-de-Obra / Método</i>	35
4.4.4 <i>Simulação computacional do projeto GX-65</i>	35
4.4.5 <i>Ações e Contramedidas</i>	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 SELEÇÃO DO PROBLEMA.....	36
5.2 DEFINIÇÃO DO TIME	37
5.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	40
5.4 ESTUDO DO SISTEMA	42
5.4.1 <i>Avaliação da Máquina / Molde</i>	43
5.5 AÇÕES E CONTRAMEDIDAS	51
6. CONCLUSÃO.....	55

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	556
REFERÊNCIAS	57
ANEXOS	62

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais poliméricos é crescente em diversos setores da economia mundial, incluindo construção civil, alimentício, automobilístico entre outros. Nesta perspectiva, o processo de moldagem por injeção tem se revelado como um dos principais processos de transformação de polímeros devido vantagens, tais como versatilidade, vasta aplicabilidade e produtividade (SILVA, 2009).

Em 2016, a indústria brasileira de transformação de polímeros produziu cerca de 5,8 milhões de toneladas de material polimérico, o que corresponde a um faturamento equivalente a R\$ 65,2 bilhões de reais. Dentre os principais setores consumidores de transformados plásticos destaca-se o de automóveis e autopeças em 3º lugar, com aproximadamente 11,0 % do consumo total. No que se refere aos processos produtivos utilizados na produção destes, a moldagem por injeção corresponde a 32% do total no setor brasileiro. Nesse sentido, é crucial que a indústria garanta a máxima produtividade, reduzindo custos e perdas do processo para atender a demanda do mercado (RÓRIZ, 2016).

A injeção de polímeros é um processo intermitente e versátil, ajustável por uma diversidade de parâmetros que estão diretamente associados à qualidade do produto, bem como suas propriedades. Além das condições de processamento, as características do material também possuem grande influência sobre o resultado final (BOTELHO, 2013; PINTO, 2012).

Devido à grande quantidade de variáveis do processo, é comum o surgimento de problemas esporádicos dentro do cotidiano da indústria plástica. O desenvolvimento de resoluções eficazes em tempo hábil torna-se fundamental para a manutenção da produtividade e atendimento da demanda. Nesse sentido, a apropriação de métodos e meios de análise disponíveis na indústria é crucial para que se possa obter bons resultados no que se refere à solução de problemas (PINTO, 2012; SILVA, 2009).

A demanda por peças de melhor qualidade tem impulsionado, portanto, a formulação de técnicas aplicáveis ao ambiente industrial, capazes de solucionar problemas robustos de forma simples e eficaz. Neste contexto, a simulação computacional adquire destaque,

constituindo-se como uma ferramenta poderosa na avaliação de condições de processamento e eficiência de projetos (ESTACIO, 2004; BUSATO, 2004).

Existem, ainda, outras técnicas e metodologias que se empenham em aumentar a eficiência e eficácia de um processo. As ferramentas de qualidade são comumente aplicadas nas etapas de planejamento e desenvolvimento do projeto e buscam identificar as falhas e a projetar ações de maneira simplificada e efetiva. Muitas dessas ferramentas são de origem japonesa e são, atualmente, consolidadas no ambiente industrial. Dentre elas, vale destacar o *Gemba* ou 5G, ferramenta que procura auxiliar a determinação do problema a partir da observação direta, possibilitando, muitas vezes, que as falhas sejam solucionadas mais rapidamente (IMAI, 1996).

Neste contexto, foi realizado a análise de um problema recorrente de uma empresa multinacional voltada à produção de faróis e lanternas. A empresa é bastante consolidada no mercado interno e externo e conduz vários projetos, dentre eles o de nome fictício GX-65. O projeto GX-65 apresenta, atualmente, um problema de injeção recorrente, as peças injetadas apresentam um defeito de falha de preenchimento ou bolha, que tem gerado redução da produtividade e um índice significativo de refugo.

Para análise do defeito, foram utilizadas as estratégias oriundas do *World Class Manufacturing* (WCM), descritas por Schonberger (1986) e Rubrich, Watson e Fayad (2015). Estas são aplicadas em muitas empresas, com o intuito de estabelecer melhorias na produção, melhorando a competitividade no mercado consumidor (SCHONBERGER, 1986). Além disso, utilizou-se a simulação computacional para a análise do comportamento do polímero durante a fase de preenchimento do molde, de modo a detectar possíveis falhas no projeto.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma análise crítica e prática de um problema de injeção recorrente em uma empresa multinacional, projetando ações à equipe multidisciplinar do projeto.

Em vista do objetivo principal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os conceitos e generalidades referentes ao processo de injeção;
- Compreender a aplicação de ferramentas presentes na indústria que auxiliam na análise de problemas;
- Avaliar o produto a partir do conhecimento teórico da academia juntamente com o conhecimento prático de projetistas e especialistas envolvidos na área injeção e ferramental;
- Reduzir o índice de refugo da empresa.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

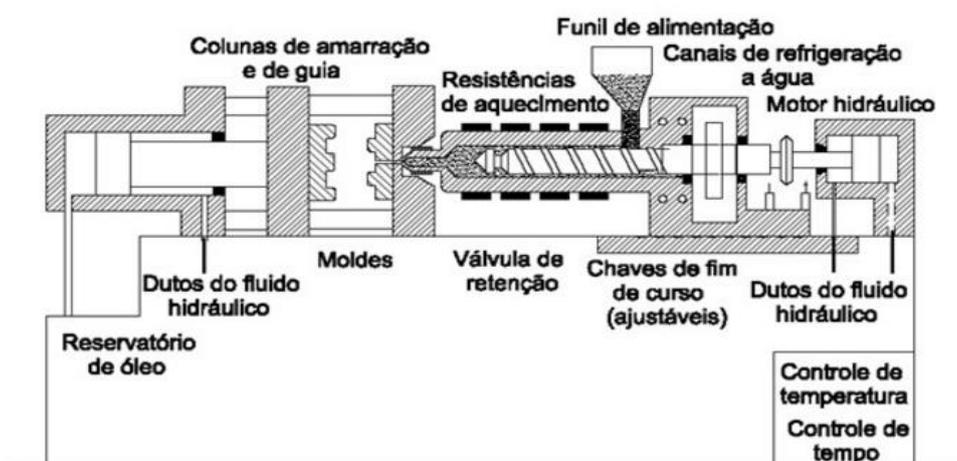
3.1 Processo de Moldagem por Injeção dos Polímeros

A moldagem por injeção consiste, essencialmente, na pressurização de polímero no estado plastificado em uma cavidade que possui a forma negativa da peça na qual se deseja fabricar (GRANADO, 2010; KENNEDY, 2008).

A injeção de polímeros é um processo intermitente, versátil e de elevada produtividade, na qual é possível se obter geometrias complexas, em uma faixa ampla de peso. Pode ser aplicada a termoplásticos, elastômeros e termofixos em diferentes condições de processamento, tendo em vista diversos fins (BOTELHO, 2013; LI et al., 2011; ILINCA; HÉTU, 2010; PETERS et al., 1994).

A grande maioria das máquinas de injeção (figura 1) é composta por rosca recíproca, projetada para atender a um determinado material com características específicas. Esta deve ser capaz de promover a plastificação e homogeneização do fundido de forma eficiente (BUSATO, 2004; HARADA, 2004).

Figura 1 - Esquema da Máquina de Injeção



Fonte: Langhaz (2012)

A moldagem por injeção segue um ciclo, denominado “ciclo de injeção” que pode ser subdividido em: ciclo de rosca recíproca e de molde. O primeiro está relacionado à

alimentação do polímero na injetora, transporte, plastificação, pressurização e homogeneização do mesmo. O segundo, por sua vez, refere-se ao preenchimento, resfriamento e ejeção da peça, basicamente (DIHLMANN, 1993; KENNEDY, 2008; MANRICH, 2005; TADMOR, 2006).

3.2 Ciclo de Injeção

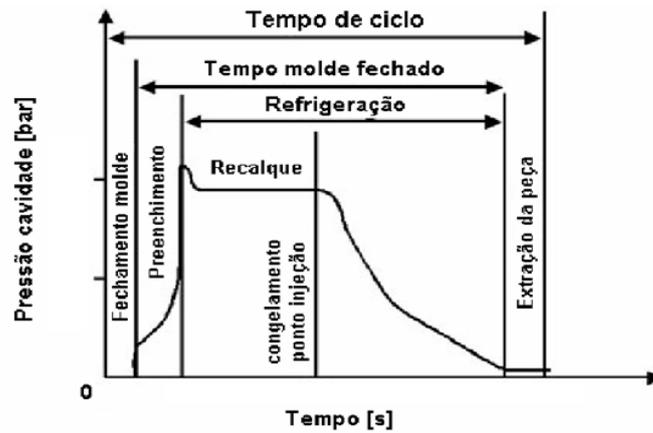
O polímero é alimentado a partir do funil de alimentação e a rosca opera como uma rosca de extrusão, plastificando, homogeneizando e pressurizando o polímero. À medida que o material é transportado para a parte frontal da máquina, o parafuso se desloca para trás, formando uma reserva para promover o preenchimento da cavidade do molde em uma etapa posterior. Esse polímero acumulado não é imediatamente injetado no molde, já que uma válvula veda o bico de injeção durante o estágio de plastificação (LANGHANZ, 2012; MANRICH, 2005).

No estágio de preenchimento, a rosca passa a atuar como um pistão, injetando a massa fundida para o interior do molde, que se encontra, normalmente, a uma temperatura inferior à temperatura de solidificação do polímero. Nesta etapa de injeção, a pressão dentro da cavidade aumenta continuamente (GRANADO, 2010; TADMOR, 2006).

Já durante o empacotamento, o pistão mantém a pressão sobre o molde, evitando o retorno de material aos canais de alimentação. Assim, após o tempo de pressurização e recalque, a rosca retorna ao seu estado inicial. O molde permanece fechado por um tempo, até que se conclua o processo de resfriamento. Em seguida, este se abre e a peça é ejetada (LANGHANZ, 2012; GILL, 2012).

A pressão na cavidade do molde em função do tempo durante o processo de injeção é representada pela figura 2. Nota-se que a fase de preenchimento requer um tempo muito menor em comparação ao período de refrigeração (BUSATO, 2004).

Figura 2 - Pressão na cavidade do molde x Tempo

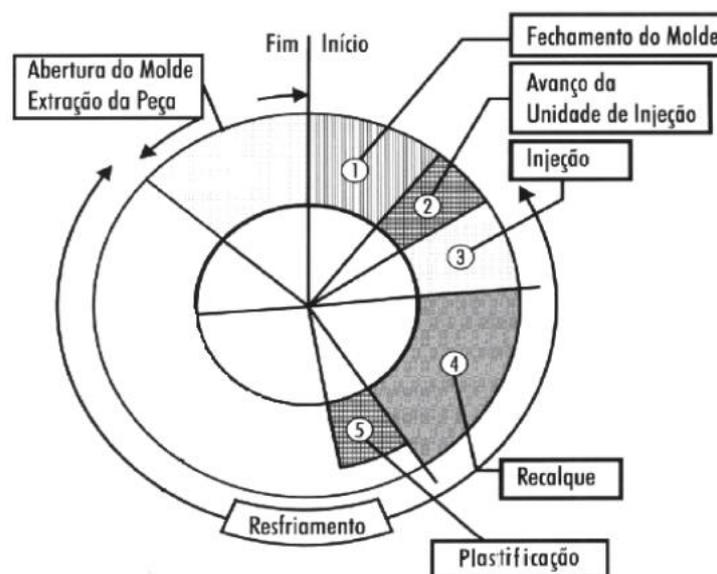


Fonte: Busato (2004)

O estágio de resfriamento é responsável por determinar o tempo total do ciclo de injeção, já que se constitui como a etapa de maior duração durante o processo de moldagem por injeção. Este tempo de resfriamento está intimamente relacionado com a espessura do material, condutividade térmica do polímero, propriedades mecânicas da peça final, dentre outros fatores (CORAZZA, 2012; HARADA, 2004).

A figura 3 é uma representação do ciclo de injeção, em que os tempos relativos a cada etapa do processo são demonstrados.

Figura 3 - Representação do Ciclo de Injeção



Fonte: Corazza (2012)

Segundo Harada (2004), a etapa de resfriamento, uma vez que consome a maior parte do tempo do processo de moldagem, constitui-se como um dos fatores determinantes do custo final da injeção. Nesse sentido, busca-se, geralmente, obter ciclos de injeção curtos que não produzam peças com grande quantidade de defeitos (BOTELHO, 2013).

3.3 Comportamento Reológico dos Polímeros

Os polímeros apresentam um comportamento viscoelástico quando sujeitos à deformação, isto é, exibem características viscosas e elásticas, o que torna possível a recuperação elástica destes materiais, quando cessado o esforço (D'ÁVILLA, 1997; ÖSTERGREN, 2013).

Para definir os perfis de velocidade, vazão, pressão e taxa de cisalhamento durante o processo de moldagem por injeção, é necessário determinar a equação reológica de estado ou equação constitutiva do material, que estabelece a relação entre o tensor tensão e a taxa de deformação. Essas equações são responsáveis por definir o comportamento reológico do material, que em condições específicas de processamento pode ser representado, adequadamente, como fluido Newtoniano (BRETAS; D'ÁVILA, 2005). Em situações, por exemplo, em que são impostas baixas ou altas taxas de cisalhamento, como no meio de uma cavidade de parede espessa e em pontos de estrangulamento do molde, respectivamente, a viscosidade pode ser considerada constante (NISHIMOTO, 2001).

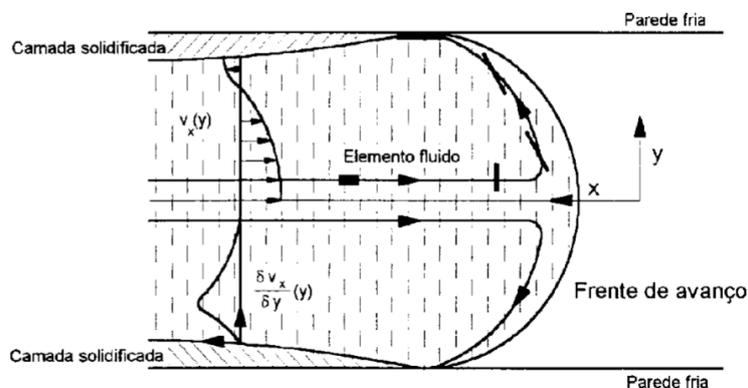
3.4 Características do Escoamento durante o Processo

A orientação molecular ao longo da espessura da peça injetada está diretamente relacionada aos perfis de velocidade gerados pelo fluxo durante a fase de preenchimento do molde, bem como à alguns parâmetros de processo, dentre eles a pressão de injeção e a temperatura do fundido (ALMEIDA; BRANCIFORTI; BRETAS, 2007).

A frente de escoamento, conhecida como fluxo em chafariz, possui velocidade máxima no núcleo, porém, à medida em que o polímero entra em contato com as paredes do molde, a velocidade é reduzida, formando uma camada solidificada (Figura 4), com baixa orientação molecular. Vale ressaltar que é necessário se ter uma velocidade de injeção

mínima, na qual não se tem o congelamento prematuro do polímero no molde (MANRICH, 2005).

Figura 4 - Fluxo em Chafariz



Fonte: Nishimoto (2001)

A camada congelada funcionará como um isolante térmico, reduzindo as trocas de calor da massa polimérica com o molde. Próximo a camada congelada, contudo, a massa polimérica é submetida a altas taxas de cisalhamento, apresentando, portanto, moléculas bastante orientadas (MANRICH, 2005).

Destaca-se que o polímero fundido durante a fase de preenchimento do molde de injeção está sujeito a um atrito elevado e, portanto, a um aquecimento devido ao efeito de dissipação viscosa (ZDANSKI; JÚNIOR; DIAS, 2009).

Em direção ao centro, contudo, a orientação decai, uma vez que as moléculas tendem a recuperar a deformação sofrida antes de se efetivar o resfriamento completo da massa polimérica. Já na região do ponto de injeção as moléculas se orientam bastante, e como resultado, pode ocorrer o início da cristalização induzida por tensão cisalhante (MANRICH, 2005).

Estudos de análise do escoamento de polímeros no interior dos moldes de injeção possuem grande relevância para os processos industriais, despertando grande interesse no cenário atual. Nesse sentido, Zdanski, Júnior e Dias (2009) utilizaram a simulação numérica para compreender o comportamento dos polímeros no interior de canais que apresentam redução brusca da seção.

3.5 Parâmetros de Processo *versus* Problemas de Injeção

A qualidade, bem como as propriedades de uma peça injetada, está intimamente relacionada a alguns parâmetros do processamento, dentre eles, as pressões que atuam sobre o material durante o processo, a temperatura do molde e do polímero, velocidade de injeção, rotação da rosca e os tempos de injeção, resfriamento e recalque. Logo, determinar esses parâmetros é de fundamental importância, uma vez que estão diretamente associados a uma série de defeitos que podem surgir na peça moldada (PINTO, 2012).

Os defeitos nas peças moldadas por injeção se formam em virtude de uma diversidade de fatores, sendo os principais decorrentes das condições de processamento. Além da degradação térmica, rebarbas, rechupes, as linhas de solda e o empenamento da peça são exemplos de deformidades que podem prejudicar o acabamento superficial ou mesmo contribuir para um desempenho deficiente do produto final (MANRICH, 2005; PINTO, 2012).

De modo geral, as características do material também possuem grande influência sobre o processamento, já que polímeros com viscosidades mais elevadas requerem pressões de injeção maiores. Além disso, a estrutura química fornecerá um indício da susceptibilidade do material à degradação, sendo fundamental limitar a pressão na qual o polímero pode ser injetado sem que sofra alterações estruturais (MANRICH, 2005).

Vale ressaltar, ainda, que cada material possui uma temperatura de injeção ideal, que pode apresentar variações em detrimento do tempo de residência do material na máquina de injeção, complexidade da peça a ser produzida e o projeto do molde (BUSATO, 2004). Essa temperatura também é limitada pela degradação térmica do material, devendo, portanto, ser bem ajustada, para que não se tenha perda das propriedades do material, quando submetido ao processamento (DIHLMANN, 1993; PINTO, 2012).

A temperatura do molde é outro fator a ser considerado no processo, uma vez que influencia no acabamento superficial da peça, contração, tensões residuais, empenamento e estrutura morfológica do polímero (ÖSTERGREN, 2013; PINTO, 2012).

A pressão de injeção pode ser definida como a pressão necessária para preencher a cavidade do molde, sendo, portanto, um parâmetro essencial a ser controlado durante processo. A pressão de injeção está associada a uma série de fatores, dentre eles: tipo de material, complexidade da peça e temperatura do molde. Existe uma faixa limitante na qual é possível variar este parâmetro, pois pressões excessivas tendem a formar rebarbas, enquanto que pressões inferiores ao requerido pode interferir no fluxo de material, de modo a ocasionar falhas no preenchimento (BOTELHO, 2013; BUSATO, 2004; ÖSTERGREN, 2013).

No que se refere à pressão de recalque atua na peça já completa, compactando e evitando a contração desta durante do resfriamento. Rechupes, linhas de solda e empenamento são problemas de injeção comuns decorrentes de uma pressão de recalque que não esteja devidamente regulada. Já a contrapressão está intimamente relacionada ao cisalhamento do material, pois é a pressão que se opõe ao retorno da rosca durante a dosagem do material. Deste modo, não se recomenda contrapressões elevadas para o processo, o suficiente, apenas, para evitar a formação de bolhas na peça (BUSATO, 2004).

3.6 Bi-Injeção

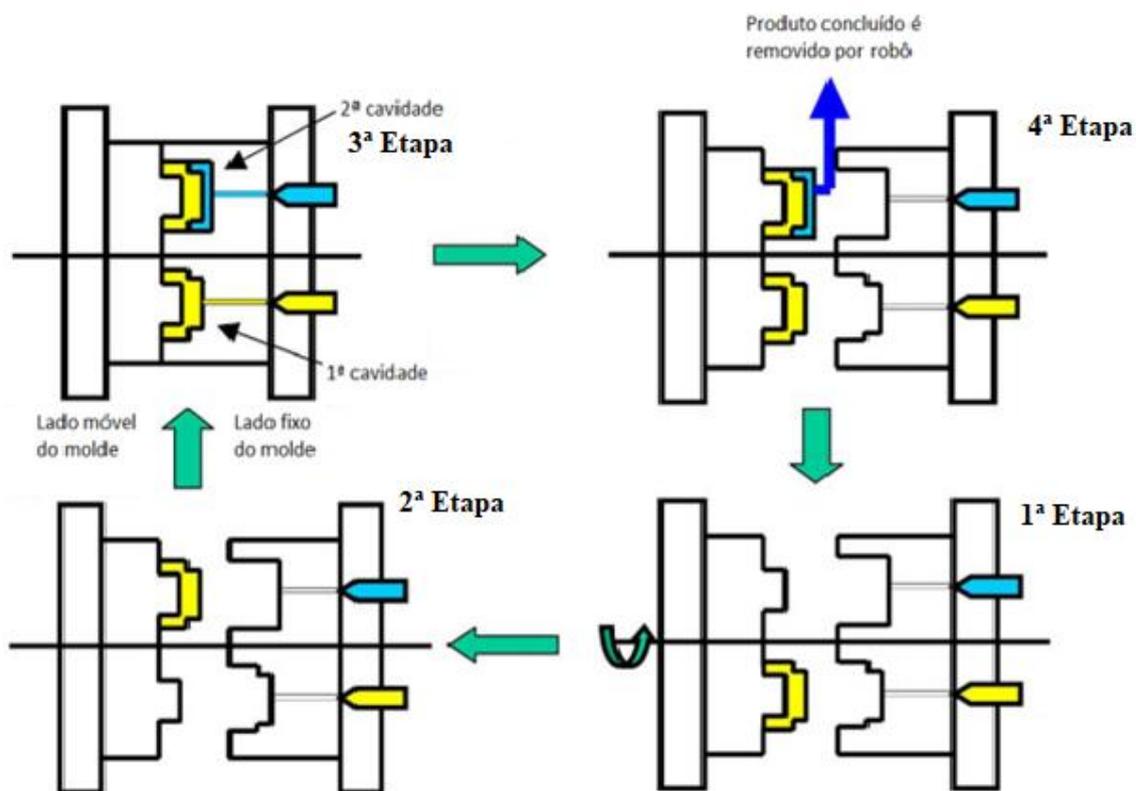
A bi-injeção é uma variante do processo de injeção de dois componentes distintos em termos de cor e/ou material. Destaca-se como principal aplicação a lanterna traseira de veículos automotivos, mas possui diversos outros empregos. Uma das técnicas de bi-injeção é por meio de moldes rotativos. Vale ressaltar que neste caso a máquina injetora é composta por duas unidades de injeção) e os dois materiais são injetados dentro de suas respectivas cavidades em dois estágios distintos (LI; GUPTA, 2003; WAECHTER, 2013).

O ciclo da bi-injeção (Figura 5) foi descrito por Waechter (2013):

O primeiro material é injetado para dentro da primeira cavidade para formar o primeiro componente do objeto final. O segundo material é injetado através da segunda unidade de injeção para dentro da segunda cavidade do molde e sobre o objeto parcialmente concluído, proveniente do primeiro estágio. Após o material injetado se solidificar, o molde é então aberto. Neste momento, a peça já concluída, que está na posição do segundo estágio é removida do molde. A placa rotativa do molde é então acionada e desta forma as cavidades trocam de posição. O molde é fechado novamente e, conseqüentemente, completa um

ciclo da injeção.

Figura 5 - Processo de bi-injeção através de molde com placa rotativa



Legenda: 1ª Etapa: injeção do material 1 / 2ª Etapa: rotação do molde móvel / 3ª Etapa: injeção do material 2 sobre o material 1 / 4ª Etapa: remoção da peça do molde pelo robô.

Fonte: Waechter (2013)

3.7 Métodos de Análise

3.7.1 Simulação Computacional

A simulação na área de moldagem por injeção surge com o intuito de otimizar os parâmetros do processo, ajustando as melhores condições de processamento e prevenindo, ainda, possíveis erros no projeto (CORAZZA, 2012; KENNEDY, 2008).

A demanda por peças de melhor qualidade tem impulsionado o campo da simulação. Nesse sentido, o advento e o desenvolvimento das ferramentas computacionais, permitiram um avanço significativo na área de moldagem por injeção. Atualmente, existe uma série de ferramentas comerciais de simulação que permitem avaliar as condições

ótimas de processamento, bem como a eficiência de projetos, reduzindo custos com possíveis defeitos (ESTACIO, 2004; BUSATO, 2004).

As ferramentas de simulação, *Computer - Aided Engineering* (CAE) podem ser destinadas para a análise do comportamento do polímero durante a fase de preenchimento do molde, bem como para detecção de falhas no projeto, evitando a interrupção do processo, o que acarretaria em custos desnecessários e perda de material. Dessa maneira, várias combinações de projetos, materiais e parâmetros podem ser estudadas e testadas de forma rápida e econômica, aumentando a produtividade industrial (GILAT; SUBRAMANIAM, 2008; GRANADO, 2010).

Além disso, as soluções analíticas que descrevem o processo de injeção, devido ao grande número de simplificações necessárias à resolução, tornam-se insatisfatórias. Em vista disso, faz-se fundamental o uso de soluções via simulação computacional para obter resultados mais condizentes com a realidade (D'ÁVILLA, 1997).

Segundo Nishimoto (2001), o primeiro trabalho empírico na área injeção que corroborou para o entendimento do comportamento do polímero durante o processo de preenchimento do molde foi publicado na década de 50 por Spencer e Gilmore. Foi somente na década de 70, contudo, que foram realizados os primeiros estudos na área de simulação, que buscavam simular, basicamente, o preenchimento de cavidades de geometrias simples, retangular ou circular, e espessura fina. Além disso, consideravam o escoamento como sendo unidimensional e utilizam o método das diferenças finitas para solucionar as equações de conservação (D'ÁVILLA, 1997).

Em 1978 foi lançado o primeiro código comercial, MoldFlow, desenvolvido com o intuito de tornar possível a determinação de alguns parâmetros ótimos a determinadas condições de processamento. Apesar de certas limitações do programa nesta primeira edição, a disponibilidade deste software no mercado possibilitou um avanço nos estudos voltados à simulação (NISHIMOTO, 2001).

O Moldflow, programa utilizado no trabalho em questão, é um software desenvolvido para a análise de escoamento, compactação, resfriamento, estrutura de termoplásticos, bem como determinação de condições ótimas de processo. É composto por uma gama de

dados reológicos (*MADRAS*), uma base para execução da geometria a ser analisada, um gerador de malha de elementos finitos e um programa de resolução dos métodos numéricos. O programa permite, ainda, fazer uma análise em 2D ou 3D, possibilitando avaliar tanto a temperatura quanto o tempo de injeção ideal do processo, como também o comportamento do polímero a partir de visualização gráfica tridimensional (DIHLMANN, 1993; NISHIMOTO, 2001).

O programa utiliza o método dos elementos finitos para resolver numericamente, as equações descritas pelo modelo matemático. A solução envolve a discretização da peça (domínio físico) em um número de elementos (subdomínios), que permite definir de forma satisfatória variáveis de processo (BRETAS; D'ÁVILLA, 2005; NISHIMOTO, 2001).

3.7.2 WCM e as Ferramentas de Qualidade

Segundo Schonberger (1986), as estratégias conhecidas como *World Class Manufacturing* (WCM) têm se difundido para um número cada vez maior de organizações, que buscam melhorias na manufatura e ótimo desempenho, visando se tornarem mais competitivas no mercado.

O termo WCM foi utilizado por Schonberger (1986) como um conjunto de práticas japonesas voltadas a qualidade e ao conceito *Just-in-Time* que buscam melhorar a eficiência da empresa, bem como sua produtividade, promovendo-a à Manufatura de Classe Mundial.

Nessa perspectiva, a gestão da qualidade tem se tornado fundamental para a manutenção das empresas no mercado competitivo. Deste modo, existem diversas técnicas e metodologias aplicáveis no ambiente industrial que buscam empregar, essencialmente, os conceitos de qualidade em uma organização (LUCIETTO et. al, 2011).

3.7.2.1 Método 5G

A metodologia *Gemba* (tabela 1) de origem japonesa, também conhecida como 5G, é uma ferramenta comumente utilizada na indústria para a resolução de problemas. O termo

gemba, cuja tradução é “verdadeiro lugar” sugere a ideia de se apurar e levantar dados no local onde o problema ocorre, poupando, assim, esforços, tempo, dentre outros. (IMAI, 1996).

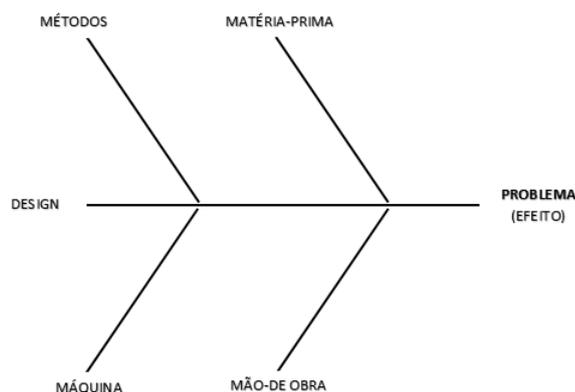
Tabela 1 - Metodologia 5G

METODOLOGIA 5G		
5G	O que é?	Objetivo
<i>Genbutsu</i>	Fenômeno Real	Avaliar o defeito a partir da observação de uma peça ou mesmo simulação do problema.
<i>Gemba</i>	Onde ocorre o problema	Melhorar o entendimento e a compreensão do problema, avaliando, assim, as possíveis causas e estabelecendo uma primeira análise no local.
<i>Genjitsu</i>	Condição real	Verificar a documentação técnica, os parâmetros, a metodologia e todas as variáveis do processo, de modo a identificar potenciais falhas.
<i>Genri</i>	Princípios teóricos	Avaliar normas e especificações técnicas
<i>Gensoku</i>	Padrões operativos	Avaliar as instruções de trabalho e os padrões operativos.

Fonte: Morais (2013)

3.7.2.2 Diagrama de Ishikawa

Ishikawa desenvolveu uma metodologia estratégia de qualidade com abrangência em toda organização, dando ênfase em todo o ciclo de vida do produto. O diagrama de Ishikawa (figura 6) ou também diagrama de causa e efeito, exemplifica a relação entre um efeito e as possíveis causas que podem estar contribuindo para que o mesmo ocorra (PINTO, 1993).

Figura 6 - Diagrama de Causa e Efeito

Fonte: Adaptado de Pinto (1993)

2.7.2.3 5W1H

A ferramenta 5W1H constitui-se como uma ferramenta auxiliar na resolução de problemas, principalmente no que se refere à fase de planejamento. Consiste, dessa forma, em um mapeamento das atividades a serem desenvolvidas. Na tabela 2 são apresentadas as etapas para estruturação da planilha do plano de ação 5W1H (SANTOS; BATISTA, 2016).

Tabela 2 - Estruturação do 5W1H

5W1H	
5 W	<i>What?</i> Que ação será executada?
	<i>Who?</i> Quem irá executar/participar da ação?
	<i>Where?</i> Onde será executada a ação?
	<i>When?</i> Quando será executada a ação?
	<i>Why?</i> Porque a ação será executada?
1H	<i>How?</i> Como será executada a ação?

Fonte: Santos e Batista (2016)

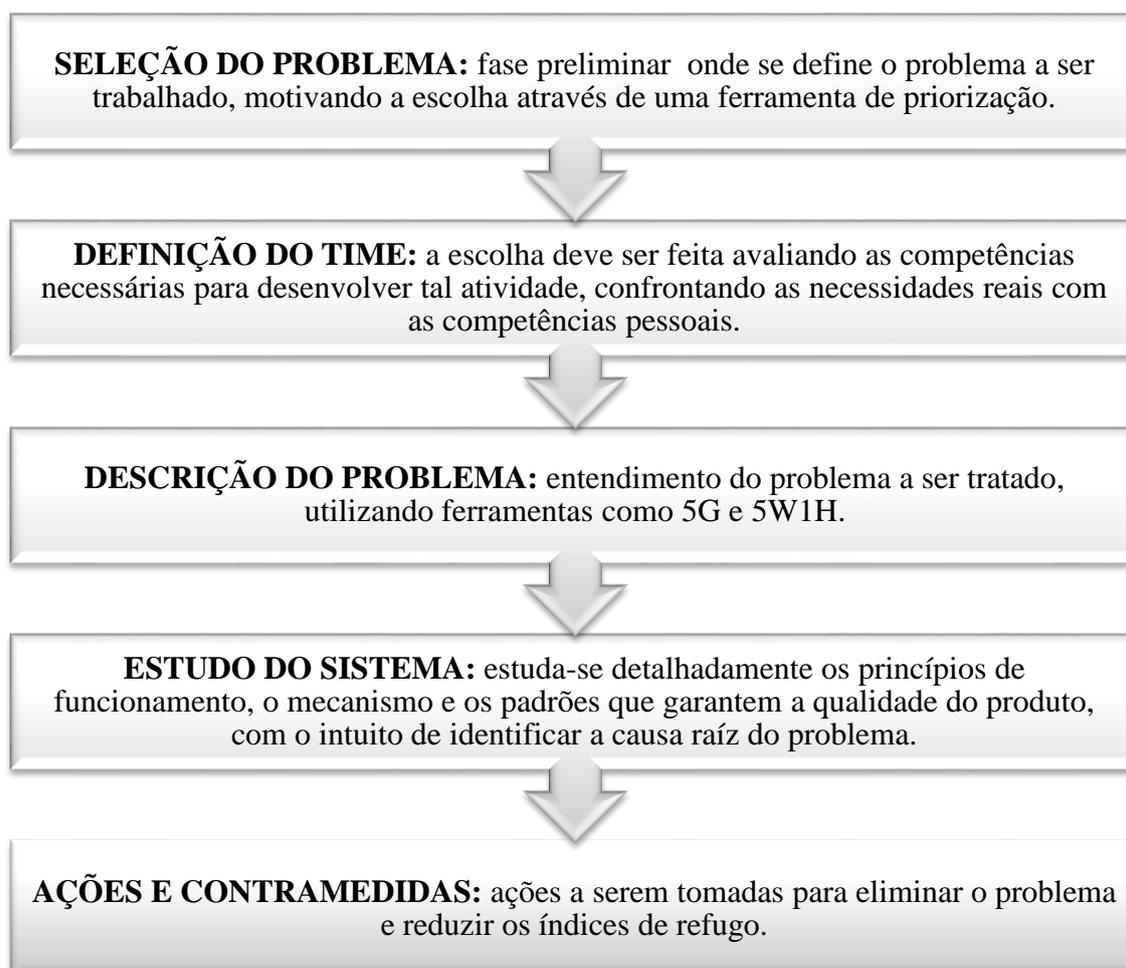
As questões descritas na tabela 2 estão interligadas, gerando um plano de ação detalhado, que permite visualizar as ações a serem tomadas, bem como a maneira que serão realizadas e quais os responsáveis pela execução de tais atividades (SANTOS; BATISTA, 2016).

4. METODOLOGIA

Nesse trabalho utilizou-se simulação computacional, Moldflow, em conjunto com as ferramentas de análise disponíveis na metodologia WCM para a solução de um problema de injeção, peças injetadas com falha de preenchimento, detectado no projeto de nome fictício GX-65 em uma empresa multinacional voltada à produção de faróis e lanternas para automóveis.

A sequência do desenvolvimento utilizada nesse projeto, desde sua definição até sua execução, foi definida de acordo com a metodologia descrita por Rubrich, Watson e Fayad (2015) é representada na figura 7.

Figura 7 - Sequência do Desenvolvimento do Projeto, seguindo a metodologia de Rubrich, Watson e Fayad (2015).



Fonte: Próprio autor

4.1 Seleção do Problema

Foi analisado um problema de injeção em um dos projetos desenvolvidos em uma empresa multinacional voltada à produção de faróis e lanternas. O projeto foi selecionado a partir dos índices de refugo reportados continuamente pela fábrica. Iniciado em 2016, o projeto não atingiu a meta de 0 defeitos imposta pelos requisitos de qualidade da companhia, sendo reaberto para nova tratativa. Utilizando o Excel, plotou-se o gráfico de peças refugadas em função do período, estabelecendo, dessa maneira, um comparativo mais nítido do montante refugado por bolha de injeção do farol GX-65.

4.2 Definição do time

O time foi estabelecido pelo estagiário de qualidade (líder do projeto) com o objetivo de organizar uma equipe multidisciplinar com as competências necessárias para agregar no desenvolvimento do projeto. Definiu-se, dessa forma, os participantes conforme conhecimento pessoal, avaliando finalmente a capacidade da equipe para o projeto.

Nesta etapa do trabalho foi realizado uma avaliação do perfil de cada colaborador por meio de entrevistas sobre as ferramentas utilizadas no projeto, bem como o uso em projetos anteriores. As ferramentas avaliadas foram: *Ishikawa*, *5G*, *5W1H*, *brainstorm*, moldagem por injeção, molde, projetos avançados (DOE, PPA) e Moldflow. As notas variam entre 0 e 5, conforme critério da tabela 3, abaixo:

Tabela 3 - Critério de avaliação de competências

Nota	Critério
1	Não conhece a ferramenta
2	Conhece a ferramenta mas nunca aplicou
3	Conhece e aplica com supervisão de alguém
4	Conhece e aplica de forma autônoma (sem suporte)
5	Conhece e é capaz de treinar as pessoas para aplicar a ferramenta

Fonte: Adaptado Rubrich, Watson e Fayad (2015).

Em seguida, foram construídos gráficos do tipo radar para exemplificar as competências pessoais e geral do grupo. Seguindo critério estabelecido pela empresa, o grupo deve possuir nota máxima em todas as ferramentas.

4.3 Descrição do problema

A injeção do farol GX-65 é realizada em uma injetora com mecanismo de bi-injeção por meio de moldes rotativos. Os parâmetros de injeção foram definidos na fase de desenvolvimento, na qual foi estabelecido variáveis tais como as temperaturas dos dois canhões, o tempo de injeção e tempo de ciclo (tabela 4). A injeção é realizada a partir de dois *gates*: o primeiro injeta o policarbonato, que irá compor a região cristal e a segundo injeta a borda preta (97 % policarbonato e 3 % máster preto).

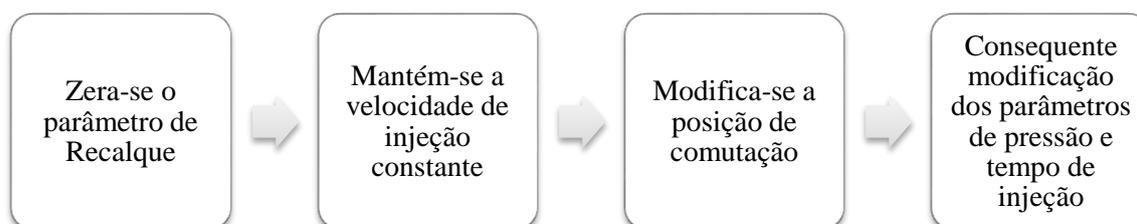
Tabela 4 - Parâmetros de Injeção

Parâmetros	Canhão I (Injeção Borda Preta)	Canhão II (Injeção Região Cristal)
Temperatura	± 280 °C	± 280 °C
Tempo de Injeção	$\pm 8,0$ segundos	$\pm 2,2$ segundos
Tempo de Injeção	± 82 segundos	

Fonte: Projeto GX-65

Nesta etapa do trabalho foi realizado uma primeira avaliação na injetora, como é retratado a metodologia Gemba para que, assim, o fenômeno pudesse ser descrito detalhadamente, de maneira eficaz. Na etapa ‘*Genbutsu*’, o defeito foi simulado experimentalmente, dividindo a injeção em 6 etapas. Para este teste foram realizados os seguintes passos (figura 8):

Figura 8 - Passos para simulação experimental



Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar, contudo, que os demais parâmetros foram mantidos conforme o projeto. Além disso, a ferramenta 5W1H também foi utilizada para levantar objetivamente o maior número de informações acerca do problema a ser tratado.

4.4 Estudo do Sistema

Nesta etapa do trabalho foi realizado uma análise mais profunda a partir do levantamento das possíveis causas para o defeito apontado. Para tanto, foi utilizado o diagrama de Ishikawa (diagrama de causa e efeito).

Vale ressaltar que esta investigação foi realizada juntamente com toda a equipe, para que pudesse ser empregado um visão multidisciplinar sobre o defeito, definindo, neste momento, as primeiras análises a serem realizadas na averiguação das possíveis causas do problema. Já para o entendimento do comportamento do fluxo de material dentro da cavidade do molde, foi realizado a simulação computacional (3.4.4).

4.4.1 Avaliação da Máquina / Molde

Foi avaliado, neste momento, variáveis apontadas no diagrama causa e efeito relacionadas à máquina e ao molde. Dessa forma, verificou-se:

- os parâmetros de injeção e o sistema de refrigeração, confrontando-os com o projeto;
- a variabilidade da máquina injetora;
- condições do molde: polimento e sujeira do molde, por inspeção visual; desbalanceamento, falhas de usinagem e entre outras condições.

4.4.1.1 Avaliação da variabilidade da Injetora

Para avaliar a variabilidade da máquina injetora, foi realizado um controle estatístico do processo por meio de inspeção de 150 ciclos de injeção, com o intuito de averiguar variabilidades do processo que possam afetar a qualidade do produto (RIBEIRO; CATEN, 2012).

Os parâmetros avaliados foram: tempo de injeção dos dois canhões de injeção e tempo de ciclo. A análise estatística foi realizada conforme descrito por Ribeiro e Caten (2012), com o intuito de definir a capacidade do processo produtivo. Para execução dos cálculos, foi utilizado o Excel.

O desvio padrão foi calculado segundo a equação 1 (RIBEIRO; CATEN, 2012):

Equação 1 - Cálculo do Desvio Padrão

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Onde:

x_i = valor da amostra

\bar{x} = média

n = número total de amostras

Já o índice C_p busca avaliar a capacidade potencial do processo sendo calculado a partir da equação (2) (RIBEIRO; CATEN, 2012):

Equação 2 - Cálculo do C_p

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \sigma} \quad (2)$$

Onde:

σ = desvio padrão

LSE = Limite Superior de Especificação

LIE = Limite Inferior de Especificação

A capacidade real do processo para características é melhor estimada pelo índice C_{pk} , que considera a média do processo é o menor valor entre C_{pki} (eq. 3) e C_{pks} (eq. 4) (RIBEIRO; CATEN, 2012):

Equação 3 - Determinação do C_{pk}i

$$C_{pki} = \frac{\bar{x} - LIE}{3\sigma} \quad (3)$$

Equação 4 - Determinação do C_{pk}s

$$C_{pks} = \frac{LSE - \bar{x}}{3\sigma} \quad (4)$$

Após a análise e estudo dos parâmetros e características do processo de injeção, foi avaliado a capacidade destes, conforme o índice C_{pk}. Segundo Ribeiro e Caten (2012), a escala de avaliação da capacidade do processo produtivo é representada na tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Escala de avaliação da capacidade do processo produtivo

Capacidade	C _{pk}
Muito Incapaz	0,33
Incapaz	0,67
Capaz	1,00
Muito Capaz	1,33
Extremamente Capaz	1,67

Fonte: Ribeiro e Caten (2012)

4.4.1.2 Avaliação da molde

Para avaliar possível desbalanceamento do molde, falhas de usinagem, problemas de preenchimento entre outros, foi realizada a análise tridimensional da região cristal e da lente completa (região cristal + borda preta).

O dispositivo utilizado na medição e análise das características geométricas dos componentes foi a máquina de medição de coordenadas (CMM), que detecta pontos discretos por meio de sonda, no caso laser.

O operador do laboratório de metrologia controla manualmente um ponto da peça, determinado no projeto como ponto de referência. Uma vez determinado este ponto, o controle é realizado através do software ArcoCad Inspection, na qual se realiza as medições em três eixos: X, Y e Z, normalmente com a precisão de micrômetros.

4.4.2 Avaliação da Matéria-Prima

4.4.2.1 Umidade

Avaliou-se a eficiência da desumidificação da matéria-prima (Policarbonato e Policarbonato + 3% Máster) a partir do Analisador de Umidade (*Infrared Moisture Analyzer with Quartz Radiator Omnimark, Model: Mark 3*). Para determinação do conteúdo de água das amostras, realizou-se a pesagem da amostra inicial e final, após o aquecimento. Deste modo, para o policarbonato puro (PC LEXAN) foi pesado o policarbonato puro e com o máster (Figura 9) para realizar a análise, as amostras foram aquecidas até a temperatura de 120 °C, conforme especificado pelo fabricante, durante um intervalo de 5 minutos. O equipamento retorna o peso inicial e final, dessa forma, é possível calcular a porcentagem de perda de água (eq. 5) cujo valor máximo de especificação não deve ultrapassar 0,02%, conforme data-sheet do fornecedor (ANEXO).

Figura 9 - Amostra PC Lexan + 3% Master



Fonte: Próprio autor

Equação 5 - Porcentagem de perda de água

$$\frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \leq 0,02 \quad (5)$$

4.4.2.2 Índice de Fluidiez

O ensaio de índice de fluidez foi realizado conforme norma ASTM D – 1238, tendo como base o *datasheet* do fornecedor (ANEXO). Para tanto foi utilizado uma balança analítica da Toledo Brasil, modelo *Adventures AR2140* e um plastômetro da Pantec, modelo XNR400C. Segundo o fornecedor o índice de fluidez utilizando um padrão de 1,2 kg a 300 °C deve estar entre 14,5 g / 10 min a 21,9 g / 10 min (ANEXO).

4.4.3 Avaliação da Mão-de-Obra / Método

Foi analisado as possíveis causas relacionadas à mão-de-obra e o método de trabalho. Avaliando o comportamento do preparador da máquina durante a ajustagem da mesma e as instruções de trabalho.

4.4.4 Simulação computacional do projeto GX-65

A simulação computacional foi realizada por um especialista em Moldflow a partir de parâmetros previamente estabelecidos para o projeto GX-65. A partir da simulação foi possível avaliar o preenchimento da cavidade do molde, bem como regiões com tendência de formação de bolhas. O software utilizado foi o Moldflow Insight versão 2016.

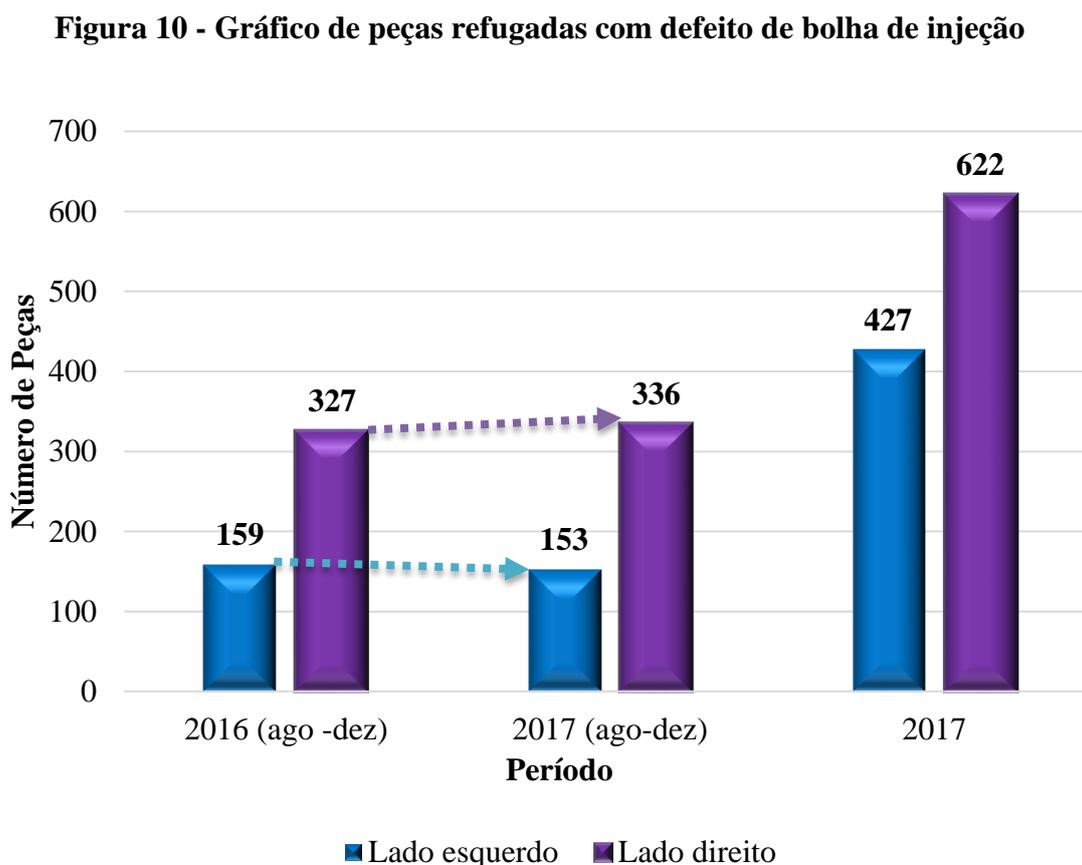
4.4.5 Ações e Contramedidas

Nesta etapa do trabalho, realizou-se uma avaliação dos resultados encontrados a partir das investigações do defeito e definiram-se ações e medidas para resolução do problema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Seleção do Problema

Entre agosto de 2016 e dezembro de 2017 foram reportados na fábrica mais de 1500 peças com problema de bolha de injeção (figura 11) do projeto GX-65, conforme a imagem 10 abaixo:



Fonte: Próprio autor

Nota-se que os índices permanecem altos mesmo após a intervenção em outubro de 2016, o que motivou a reabertura do projeto para o melhor entendimento do problema. Além disso, o comparativo entre os períodos de 2016 (ago – dez) e 2017 (ago – dez) evidencia que o número de peças refugadas mantêm-se em patamares próximos, sendo mais um indício na ineficiência das ações tomadas em 2016.

Foi possível observar, ainda, que há diferenças discrepantes entre os refugos do lado direito e esquerdo do projeto GX-65, sendo um indicativo de possível falha que afete uma

região específica da cavidade, isto é, problemas que não estejam diretamente associados a parâmetros de processo.

Figura 11 – Bolha de Injeção do Projeto GX-65



Fonte: Próprio autor

5.2 Definição do Time

Os gráficos que avaliam as competências segundo os critérios estabelecidos na metodologia são representados na figura 12. Observa-se que a equipe multidisciplinar atende ao requisito imposto pela empresa, sendo nota máxima em todas ferramentas potencialmente aplicadas durante o projeto.

Vale ressaltar que os tecnólogos de injeção (Integrante 1 e Integrante 2) possuem experiência consolidada na área, sendo responsáveis, atualmente, pela injeção de termoplásticos da fábrica e quaisquer modificações do processamento. O ferramenteiro (Integrante 3), além de possuir conhecido prático no campo de moldagem por injeção, possui qualificação e conhecimento de moldes de injeção, sendo fundamental, também, para o trabalho em questão.

Os analistas de qualidade (Integrante 4 e Integrante 5) apresentam capacitação notória em gestão de qualidade, aplicação de técnicas e metodologias de qualidade. O especialista em Moldflow (Integrante 6) atua em vários projetos na fábrica, sendo o principal responsável pelo entendimento do software. Por fim, a estagiária (Integrante 7) atua no

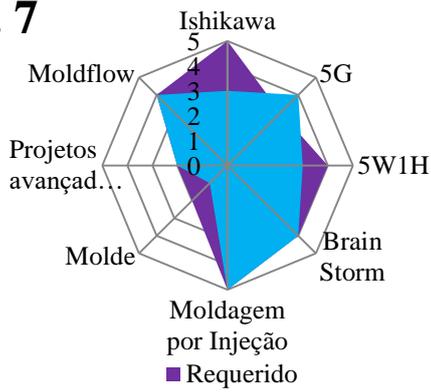
projeto como líder, sendo a principal responsável pela definição das ações e análises a serem desenvolvidas, bem como interpretação dos resultados.

Essas competências podem ser melhor exemplificadas nos gráficos de competência (figura 12), na qual é possível extrair algumas observações, dentre elas que a ferramenta de Ishikawa é conhecida por todos os integrantes da equipe, sendo aplicada de forma autônoma por seis pessoas, em que três são capazes de treinar outras para aplicação desse diagrama. No que se refere ao 5G, além dos analistas de qualidade o tecnólogo de injeção também é nota máxima nesse quesito.

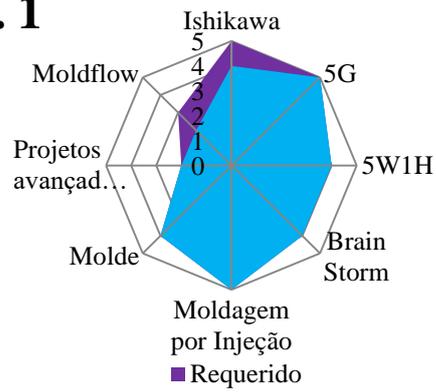
Além disso, o processo de moldagem por injeção é conhecido por todos os integrantes do projeto, na qual cinco apresentam nota máxima e dois são capazes de aplicar conhecimentos na área de forma autônoma. Apesar dessa abrangência, apenas um possui conhecimento profundo do software moldflow.

Figura 12 - Competências individuais e geral da equipe

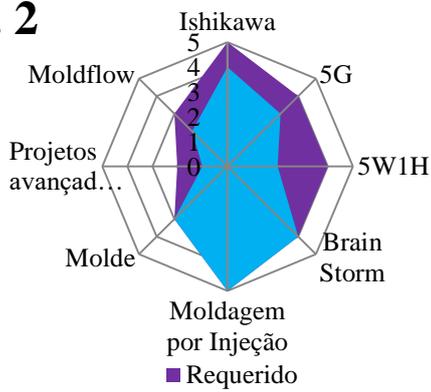
I. 7



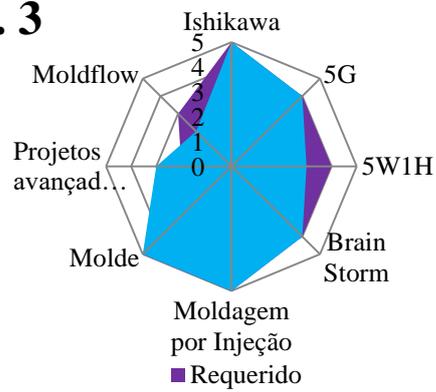
I. 1



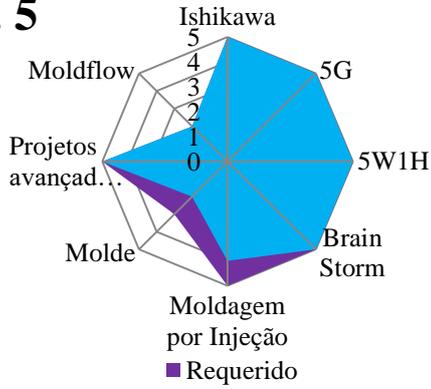
I. 2



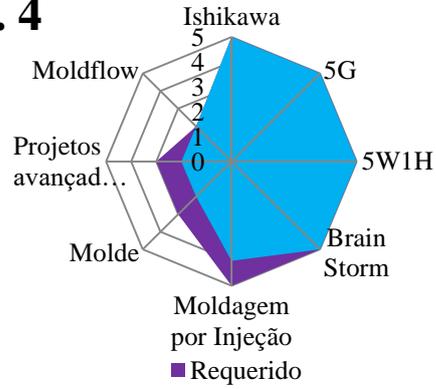
I. 3



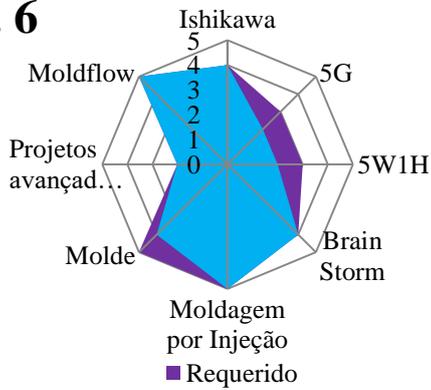
I. 5



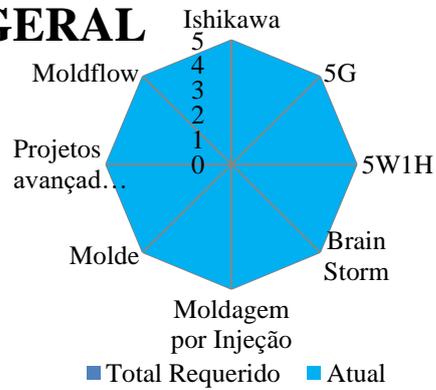
I. 4



I. 6



GERAL



Fonte: Próprio autor

5.3 Descrição do Problema

A partir da simulação experimental do defeito (figura 13), observou-se que a linha de junção ocorre na mesma região em que se tem o defeito caracterizado como bolha. A formação desta é decorrente do encontro de duas frentes de fluxo, uma vez que a injeção da peça é realizada a partir de dois *gates*.

Figura 13 - Sequência da simulação experimental



Fonte: Próprio autor

Segundo Manrich (2005) as linhas de solda podem apresentar propriedades mecânicas inferiores quando comparadas com o restante da peça, uma vez que se tem o encontro de frentes de fluxo mais frias, podendo atuar como concentradoras de tensão. No caso da peça analisada, a bolha possivelmente é decorrente do preenchimento incompleto na região, isto é, falha na formação de uma linha de solda homogênea. Este fato pode ser comprovado a partir da inspeção visual de algumas peças, na qual é possível observar que estas apresentam uma linha de solda nítida nesta região.

A falha na região da linha de junção com formação de bolha (figura 14) é identificada durante a inspeção visual pelo operador. Apesar deste fluxo no processo, o defeito da peça não foi identificado durante a cadeia produtiva, sendo reportada pelo cliente. A partir das ferramentas 5G e 5W1H foi possível levantar um bom número de informações, a definição da causa raiz deste defeito, contudo, requer mais investigações.

Figura 14 - Região de formação da bolha

Fonte: Próprio autor

As demais análises também realizadas no local são detalhadas na tabela 6:

Tabela 6 - Resumo da aplicação da metodologia 5G

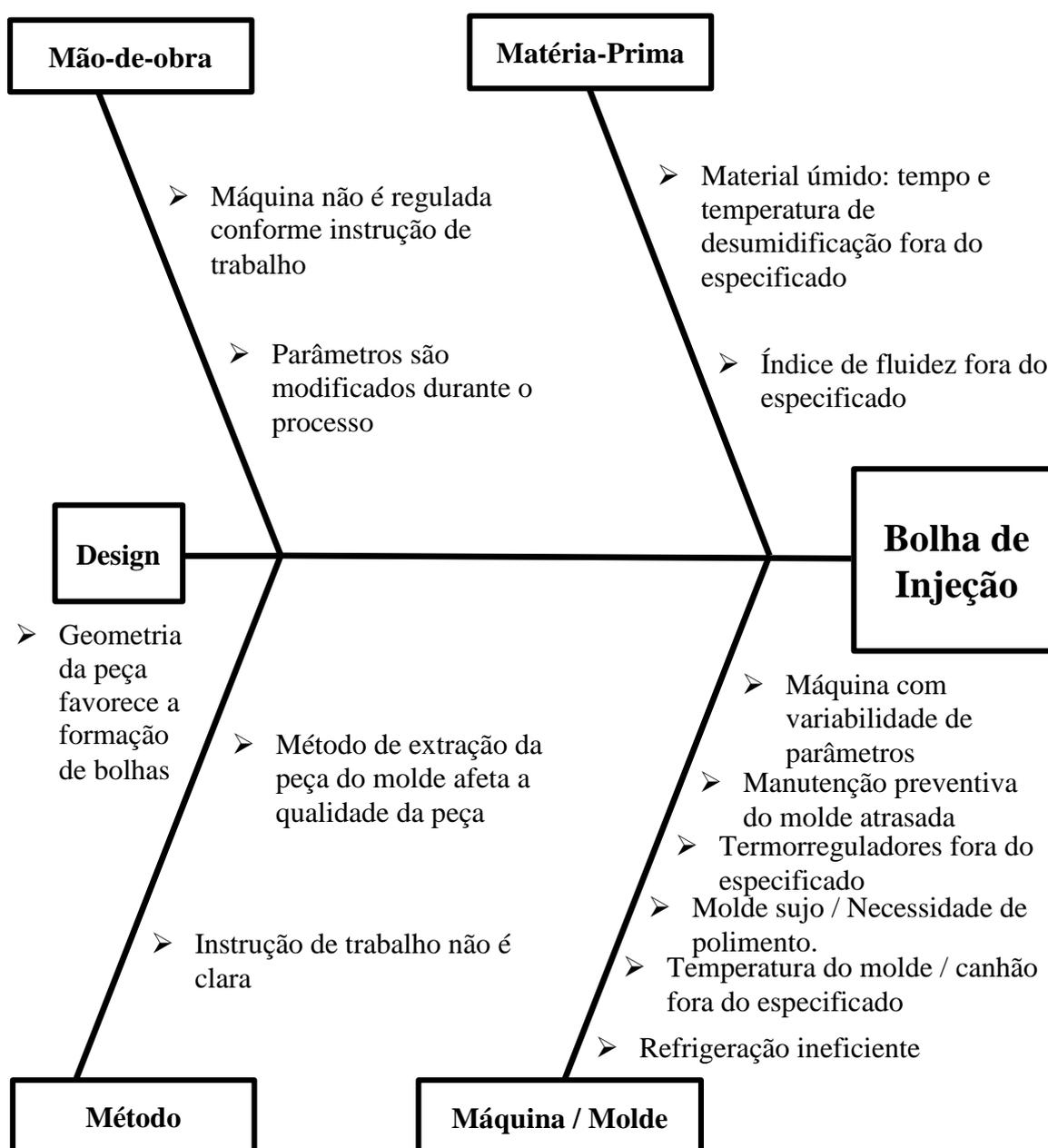
METODOLOGIA 5G		
5G	O que é?	Descrição
Genbutsu	Fenômeno Real	A simulação do defeito constatou que o fenômeno ocorre na linha de junção que se forma na extremidade borda preta da lente
Gemba	Onde ocorre o problema	A anomalia ocorre durante o preenchimento da cavidade do molde, sendo identificada após a extração.
Genjitsu	Condição real	Ocorre com frequência nos três turnos. Dados da fábrica apontam que o defeito é mais comum na peça direita. No local não foi evidenciado falhas potenciais que indicassem o defeito comum na cavidade direita.
Genri	Princípios teóricos	Documentação técnica encontrava-se revisada e atualizada, baseando-se nas especificações do produto e projeto.
Gensoku	Padrões operativos	Instrução de Trabalho encontra-se no posto de trabalho e é seguida pelo operador, que ajusta a máquina conforme os parâmetros especificados na ficha. Não foi identificado nenhum padrão operativo inadequado e não convencional.

Fonte: Próprio autor

5.4 Estudo do Sistema

O diagrama de Ishikawa evidenciando as possíveis causas do defeito na região da linha de solda é demonstrado na figura 16 a seguir. Algumas destas causas já foram descartadas com a metodologia 5G, enquanto que as demais foram analisadas e exemplificadas neste tópico 4.3.

Figura 15 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: Próprio autor

5.4.1 Avaliação da Máquina / Molde

Ao confrontar os parâmetros de injeção inseridos na máquina com o projeto inicial, constatou-se que o mesmo sofreu algumas alterações decorrentes da troca do canhão 1 (borda preta). Os novos parâmetros, contudo, foram revalidados pelos tecnólogos e inseridos nas instruções de trabalho, sendo corretamente seguidos pelos operadores. No que se refere ao sistema de refrigeração, o projeto especifica valores conforme tabela 7), enquanto que os valores verificados no local são exibidos na tabela 8:

Tabela 7 - Temperatura dos Termorreguladores conforme o projeto

1º Parte Fixa	2º Parte Fixa	3º Parte Fixa	1º Parte Móvel	2º Parte Móvel	3º Parte Móvel
90°C ± 10 °C	90°C ± 10 °C	70°C ± 10 °C	85°C ± 10 °C	85°C ± 10 °C	75°C ± 10 °C

Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Temperatura dos Termorreguladores

1º Parte Fixa	2º Parte Fixa	3º Parte Fixa	1º Parte Móvel	2º Parte Móvel	3º Parte Móvel
90 °C	90 °C	80 °C	85 °C	85 °C	80 °C

Fonte: Próprio autor

Apesar da temperatura dos termorreguladores estarem de acordo com o projeto, não se descartou a possibilidade de reavaliar o projeto de refrigeração, com o intuito de melhorar a eficiência da regulação da temperatura do molde e, conseqüentemente, o fluxo de material no interior da cavidade.

5.4.1.1 Avaliação da Variabilidade da Máquina Injetora

Os valores de tempo de injeção (em segundos) coletados em 150 ciclos de injeção do canhão 1 (borda preta) são exibidos na tabela 9.

Tabela 9 - Entrada dos valores de tempo de injeção do canhão 1

8,13	8,13	7,97	8,02	8,12	8,10	7,96	8,12	8,08	8,02	7,96	7,95	7,96	7,96	7,96
8,11	8,01	8,12	8,11	8,07	8,11	8,10	8,03	8,11	8,11	7,97	7,94	7,97	7,94	7,94
7,97	8,08	8,11	8,10	8,11	8,09	8,10	8,11	8,12	8,09	7,95	7,95	7,98	7,94	7,94
8,11	8,12	8,12	8,12	8,04	8,06	7,97	8,07	8,11	8,10	7,97	7,94	7,98	7,88	7,88
8,10	8,11	8,10	8,12	8,12	8,10	8,12	8,12	8,10	8,13	7,97	7,93	7,97	7,91	7,91
8,07	8,14	8,10	8,07	8,06	8,11	8,02	8,03	8,01	8,09	7,99	7,96	7,95	7,85	7,85
8,12	8,09	8,08	8,09	7,97	8,07	8,02	8,13	8,08	8,11	7,97	7,98	7,97	7,86	7,86
8,06	8,06	8,08	8,09	8,12	8,11	8,06	8,09	8,08	8,11	7,99	7,96	7,96	7,91	7,91
8,12	7,99	8,13	8,11	8,15	8,00	8,09	8,10	7,99	8,06	7,95	7,93	7,95	7,92	7,92
8,11	8,12	8,04	8,08	7,98	7,96	7,98	8,10	8,11	8,12	7,96	7,96	7,98	7,97	7,97

Fonte: Próprio autor

O valor segundo as especificações técnicas é equivalente a $8,00 \pm 10\%$ segundos, logo:

$$LIE = 7,20 \quad e \quad LSE = 8,80$$

A média dos tempos de injeção apresentados na tabela 6 é aproximadamente 8,03, em que o valor mínimo apontado foi igual 7,85 e máximo 8,15 segundos. O desvio foi equivalente a 0,0857. Nessa perspectiva, calculou-se C_{pki} e C_{pks} , cujos resultados são apresentados a seguir:

Equação 6 - Determinação de C_{pki}

$$C_{pki} \cong \frac{8,03 - 7,20}{3 * 0,0857} \Rightarrow C_{pki} \cong 3,24 \quad (6)$$

Equação 7 - Determinação de C_{pks}

$$C_{pks} \cong \frac{8,80 - 8,03}{3 * 0,0857} \Rightarrow C_{pks} \cong 2,98 \quad (7)$$

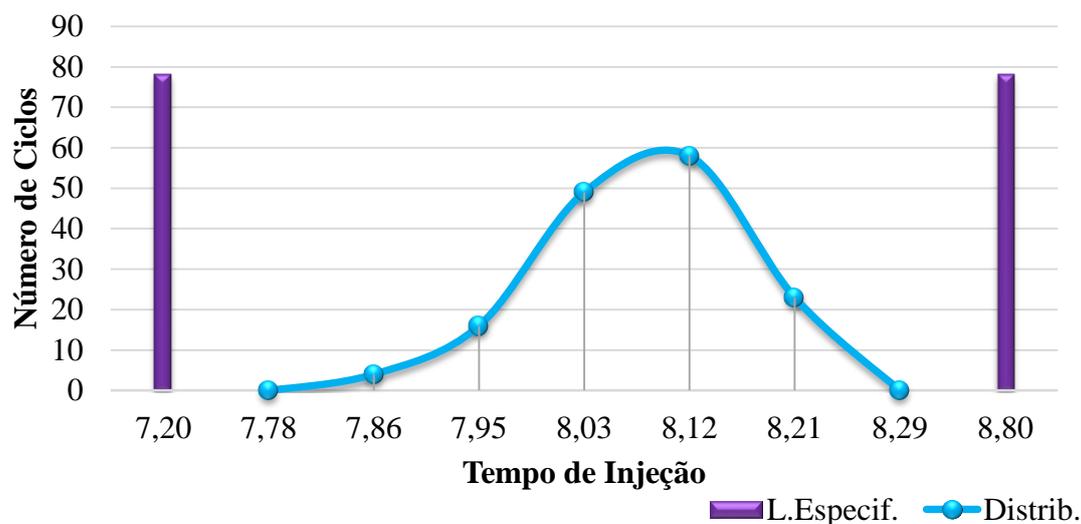
Dessa forma, constata-se que:

$$C_{pk} = 2,98$$

Logo, o processo, no que se refere a variabilidade do parâmetro de tempo de injeção do canhão 1, é classificado como capaz, isto é, não apresenta variações prejudiciais a qualidade do produto final.

O gráfico de distribuição desta variável é apresentada na figura 16:

Figura 16 - Distribuição do parâmetro de tempo de injeção do canhão 1



Fonte: Próprio autor

Os valores de tempo de injeção (em segundos) coletados em 150 ciclos de injeção do canhão 2 (região cristal) são exibidos na tabela 10.

Tabela 10 - Entrada dos valores de tempo de injeção canhão 2

2,17	2,18	2,18	2,18	2,20	2,18	2,19	2,18	2,20	2,19	2,19	2,23	2,18	2,19	2,23
2,19	2,19	2,17	2,19	2,19	2,11	2,17	2,18	2,20	2,19	2,23	2,22	2,20	2,19	2,22
2,18	2,19	2,19	2,18	2,19	2,18	2,19	2,19	2,20	2,20	2,18	2,23	2,19	2,20	2,22
2,21	2,19	2,19	2,19	2,19	2,17	2,18	2,17	2,19	2,18	2,23	2,24	2,21	2,21	2,22
2,20	2,18	2,19	2,19	2,19	2,18	2,17	2,16	2,21	2,19	2,24	2,23	2,23	2,20	2,21
2,17	2,19	2,21	2,18	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,20	2,22	2,23	2,23	2,20	2,24
2,19	2,18	2,21	2,20	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,19	2,19	2,23	2,23	2,20	2,22
2,19	2,19	2,21	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,19	2,20	2,23	2,25	2,21	2,18	2,27
2,19	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,18	2,18	2,19	2,18	2,12	2,18	2,23	2,20	2,23
2,20	2,18	2,19	2,19	2,20	2,19	2,19	2,19	2,20	2,19	2,16	2,23	2,21	2,19	2,19

Fonte: Próprio autor

O valor segundo as especificações técnicas é equivalente a $2,20 \pm 10\%$ segundos, logo:

$$LIE = 1,98 \quad e \quad LSE = 2,42$$

A média dos tempos de injeção apresentados na tabela 6 é aproximadamente 2,19, em que o valor mínimo apontado foi igual 2,11 e máximo 2,27 segundos. O desvio foi equivalente a 0,0219. Nessa perspectiva, calculou-se C_{pki} e C_{pks} , cujos resultados são apresentados a seguir:

Equação 8 - Determinação de C_{pki}

$$C_{pki} \cong \frac{2,19 - 1,98}{3 \cdot 0,0219} \Rightarrow C_{pki} \cong 3,27 \quad (8)$$

Equação 9 - Determinação de C_{pks}

$$C_{pks} \cong \frac{2,42 - 2,19}{3 \cdot 0,0219} \Rightarrow C_{pks} \cong 3,42 \quad (9)$$

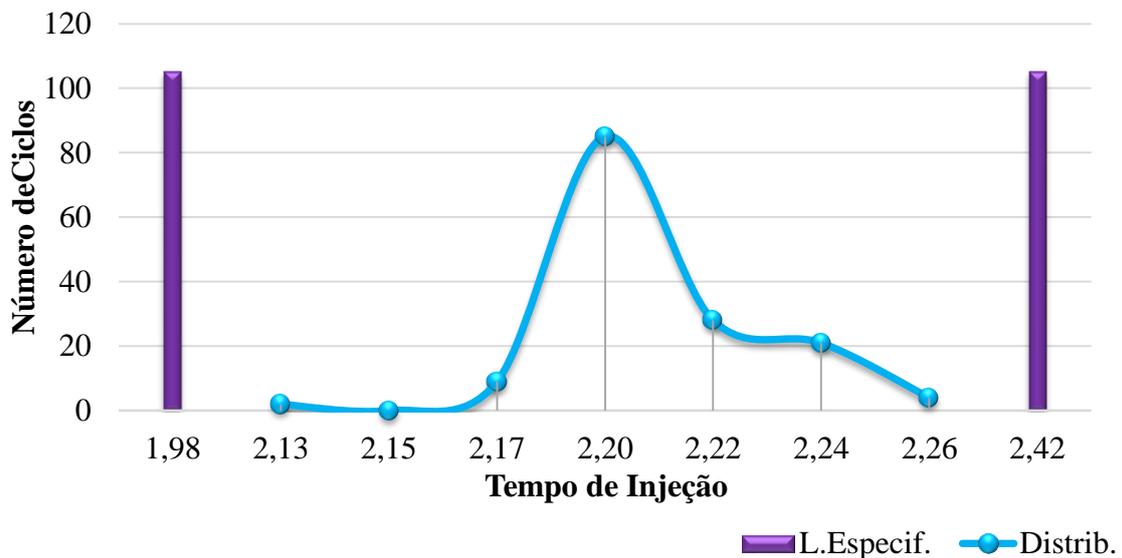
Dessa forma, constata-se que:

$$C_{pk} = 3,27$$

Logo, o processo, no que se refere a variabilidade do parâmetro de tempo de injeção do canhão 2, é classificado como capaz, isto é, não apresenta variações prejudiciais a qualidade do produto final.

O gráfico de distribuição desta variável é apresentada na figura 17:

Figura 17 - Distribuição do tempo de injeção do canhão 2



Fonte: Próprio autor

Por fim, os valores de tempo de ciclo (em segundos) coletados em 150 ciclos de injeção são exibidos na tabela 11.

Tabela 11 - Entrada dos valores de tempo de ciclo

79,95	82,07	82,02	81,96	82,04	82,26	82,02	82,08	82,08	82,24	82,21	82,23	82,07	82,13	82,23
79,59	81,90	82,05	82,06	81,95	82,35	82,21	82,01	82,01	82,15	82,06	82,17	82,27	82,26	82,20
82,33	82,05	82,03	81,95	82,07	82,30	79,95	81,98	81,98	82,21	82,24	82,20	82,24	82,21	82,18
82,31	81,93	82,04	82,05	81,97	82,15	82,04	82,04	82,03	82,20	82,15	82,24	82,30	82,26	82,17
82,31	82,02	82,08	82,00	79,25	81,99	82,02	82,02	81,95	82,23	82,21	82,23	82,21	82,19	82,21
82,26	82,02	82,01	82,05	80,98	82,07	82,07	82,07	82,04	82,24	82,20	82,24	82,26	82,18	82,18
82,05	82,21	81,98	81,89	79,59	81,90	82,02	82,02	81,95	82,24	82,23	82,22	82,22	82,20	82,06
81,98	82,04	82,04	81,98	82,33	82,05	82,05	82,05	82,07	82,23	82,24	82,23	82,23	82,25	82,27
82,15	82,02	81,95	82,03	82,31	81,93	82,03	82,03	81,97	82,17	82,24	82,10	82,22	82,19	82,24
81,99	82,07	82,04	81,95	82,31	82,02	82,04	82,04	79,25	82,20	82,06	82,26	82,18	82,23	82,08

Fonte: Próprio autor

O valor segundo as especificações técnicas é equivalente a $82,00 \pm 10\%$ segundos, logo:

$$LIE = 73,80 \quad e \quad LSE = 90,20$$

A média dos tempos de injeção apresentados na tabela 6 é aproximadamente 82,01, em que o valor mínimo apontado foi igual 79,25 e máximo 82,35 segundos. O desvio foi equivalente a 0,5187. Nessa perspectiva, calculou-se C_{pki} e C_{pks} , cujos resultados são apresentados a seguir:

Equação 10 - Determinação de C_{pki}

$$C_{pki} \cong \frac{82,01 - 73,80}{3 \cdot 0,5187} \Rightarrow C_{pki} \cong 5,27 \quad (10)$$

Equação 11 - Determinação de C_{pks}

$$C_{pks} \cong \frac{90,20 - 82,01}{3 \cdot 0,5187} \Rightarrow C_{pks} \cong 5,26 \quad (11)$$

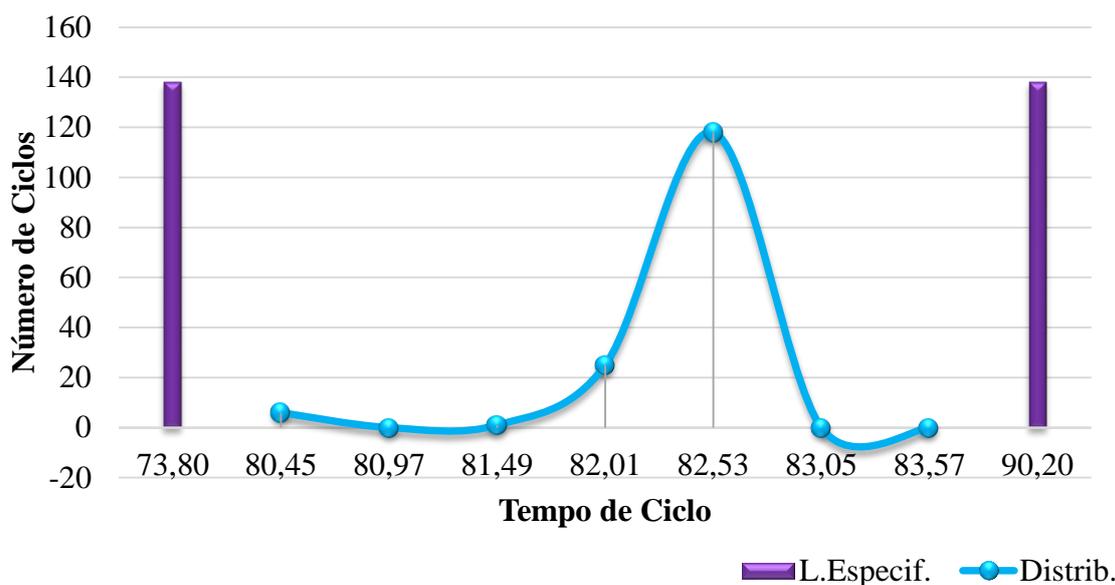
Dessa forma, constata-se que:

$$C_{pk} = 5,26$$

Logo, o processo, no que se refere a variabilidade do parâmetro de tempo de ciclo, é classificado como capaz, isto é, não apresenta variações prejudiciais a qualidade do produto final.

O gráfico de distribuição desta variável é apresentada na figura 18:

Figura 18 - Distribuição do Tempo de Ciclo



Fonte: Próprio autor

Dessa forma, pôde-se descartar possíveis variações de parâmetros da máquina que pudessem interferir no defeito apontado no farol.

5.4.1.2 Avaliação do Molde

A temperatura do molde encontra-se conforme projeto, mas em detrimento dos demais resultados encontrados, não descartou-se e reformulação e reestruturação do projeto de refrigeração do molde. Destaca-se que a manutenção preventiva do molde é realizada devidamente conforme cronograma da empresa.

A partir da inspeção visual do molde não foi detectado sujeira, necessidade de polimento ou regiões com falhas de usinagem. Para melhores resultados, foi realizada a análise da espessura de um par de lentes do farol GX-65 incompleto (região cristal) e completo (região cristal + borda preta) e não foram encontradas discrepâncias entre os lados.

Nota-se que as peças completas estão dentro das tolerâncias do desenho do projeto e a máxima diferença mensurada entre os lados direito e esquerdo foi igual a 0,28 mm (ponto 13). Pode-se descartar, portanto, falhas de usinagem e desbalanceamento do molde. Dessa

forma, conclui-se que o maior número de refugo de peças do lado direito não tem como causa condições do molde.

Além disso, a peça direita incompleta está na mesma condição da esquerda, sendo que a máxima diferença encontrada foi equivalente a 0,14 mm. Nesta etapa, não optou-se por comparar com a espessura encontrada no projeto matemático (CAD), mas somente entre os lados, pois o mesmo considera a borda preta no dimensionamento. Nesse sentido, estrangulamento e restrições de fluxo da borda preta em razão de incoerências dimensionais da região cristal, que dificultassem o preenchimento, também foi descartado.

5.4.1.3 Avaliação da Matéria-Prima

Para o policarbonato puro (PC LEXAN) foi pesado inicialmente $63,7665 \text{ g} \pm 0,0001 \text{ g}$ enquanto que para o policarbonato com o máster o peso foi equivalente à $62,7788 \text{ g} \pm 0,0001 \text{ g}$.

Para o policarbonato puro, a porcentagem de umidade encontrada na amostra foi equivalente a 0,002 % (equação 12), enquanto que para a amostra de policarbonato com 3 % de máster foi igual a 0,016 % (equação 13). Os dois valores encontram-se conforme especificações do fornecedor (ANEXO).

Equação 12 - Determinação da porcentagem de perda de água para o PC puro

$$\frac{63,7665 - 63,7652}{63,7665} \times 100 \leq 0,02 \Rightarrow 0,002\% \leq 0,02\% \quad (12)$$

Equação 13 - Determinação da porcentagem de perda de água para PC + 3% máster

$$\frac{62,7788 - 62,7685}{62,778} \times 100 \leq 0,02 \Rightarrow 0,016\% \leq 0,02\% \quad (13)$$

Para o PC puro o índice de fluidez determinado foi equivalente a 18,3 g / 10 min, enquanto para PC + 3 % máster foi igual a 15,5 g / 10 min. Ambos valores encontram-se dentro da

faixa determinada pelo fornecedor. Dessa forma, descarta-se qualquer efeito decorrente de matéria-prima não conforme.

5.4.1.4 Avaliação da Mão-de-Obra / Método

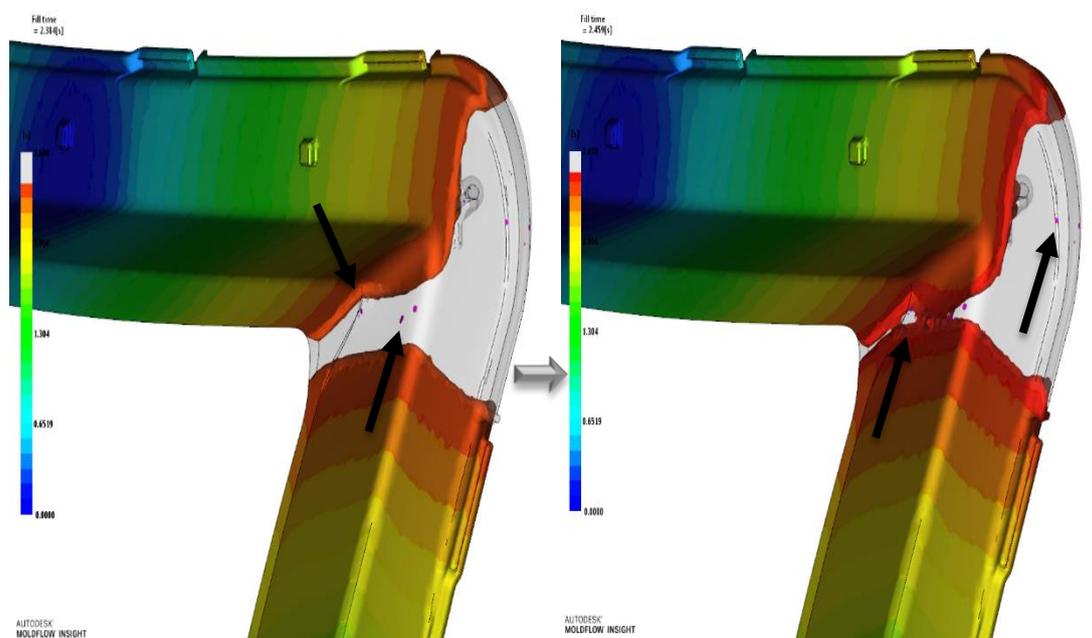
A peça é extraída do molde por um robô, cujo método de extração não afeta a qualidade da peça, no que se refere ao defeito apontado, uma vez que a mesma ocorre durante o fluxo de material, dentro da cavidade do molde.

A instrução de trabalho é clara e a máquina é devidamente regulada conforme esta documentação. Além disso, os parâmetros não são alterados durante o processo, fato que pode ser comprovado através do estudo de variabilidade da máquina de injetora (4.3.1.1).

5.4.1.5 Simulação computacional do projeto GX-65

É possível notar que o preenchimento da peça tende a aprisionar bolhas na região de formação da linha de solda (figura 19), pontos semelhantes com os observados durante a inspeção visual da peça.

Figura 19 - Representação da região de formação da bolha no Moldflow



Fonte: Próprio autor

“O polímero fundido ao preencher o molde empurra o ar para frente e este escapa por algum orifício existente” (MANRICH, 2005). A questão, neste caso, é que não há saídas de gás na região apontada, isso porque a região cristal, que é injetada primeiramente, atua como uma barreira, vedando e propiciando o aprisionamento de ar.

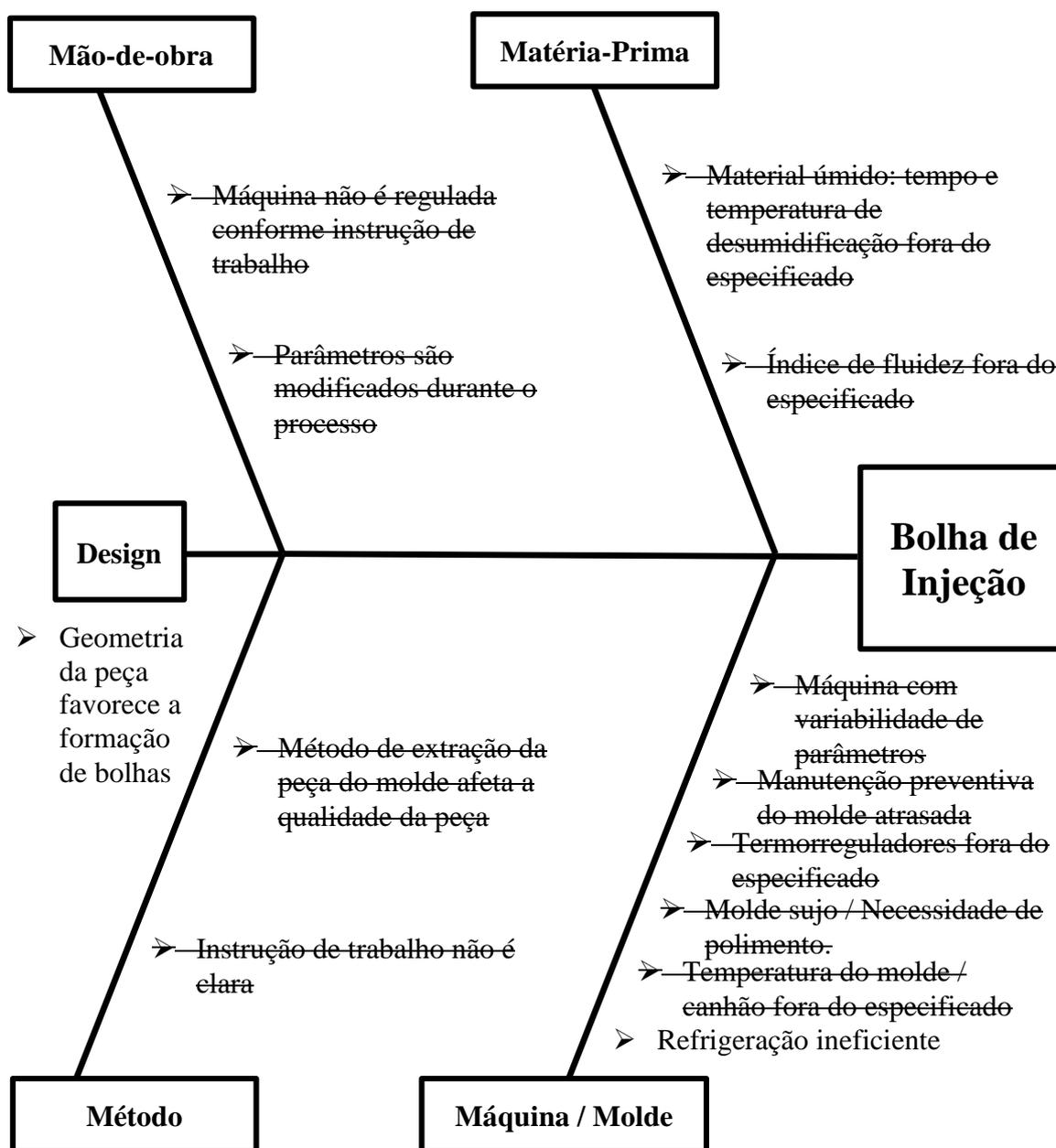
Além disso, a geometria da peça, bem como sua complexidade tendem a dificultar o preenchimento da cavidade na região apontada. Segundo Manrich (2005), durante o preenchimento do molde, as paredes retiram calor da massa quente ao mesmo tempo em que é gerado calor por atrito. Dessa forma, “se a quantidade de calor tirada for maior que a quantidade de calor gerado por atrito”, tem-se uma redução da temperatura do fundido, podendo prejudicar o preenchimento da cavidade com o congelamento prematuro que impede o fluxo até a finalização do processo. Nessa perspectiva, a falha de preenchimento e em alguns casos a formação de uma linha de solda nítida são indícios não apenas do design da peça, como também de uma refrigeração deficiente do molde, em especial na região apontada.

Embora represente satisfatoriamente a propagação das frentes de fluxo no preenchimento da cavidade, nesta simulação as estimativas de tempo de preenchimento para o molde não condizem com a realidade. Isso se deve às simplificações do software, que não prevê perdas de calor e não considera o complexo sistema de refrigeração (GRANADA, 2012).

5.5 Ações e Contramedidas

Após a análise realizadas, algumas das possíveis causas apontadas pelo o Ishikawa foram eliminadas. Um resumo é mostrado na figura 20.

Figura 20 - Diagrama de Ishikawa após análises



Fonte: Próprio autor

É possível observar que as causas relacionadas ao método, mão-de-obra e matéria-prima foram completamente descartadas. A análise apontou duas possíveis causas para o problema de injeção relatado: geometria e refrigeração.

De fato a geometria da peça favorece a falha de preenchimento na região, ponto confirmado pela análise no Moldflow. Além disso, o aspecto da linha de solda e o defeito

neste mesmo local é um indicativo da refrigeração ineficiente do molde na região do defeito.

Como não é possível eliminar o ar aprisionado na linha de solda através de furos de escape, como já sugerido por Manrich (2005), pode-se transferir a linha de solda para posições onde irá gerar menores prejuízos estéticos, podendo alterar, assim, a posição do defeito (apontado como bolha de injeção) para regiões não visíveis do carro montado.

Atualmente, a máquina injetora já opera com retardo de injeção do gate inferior em relação ao superior para favorecer o deslocamento da linha de solda, o que não tem gerado resultados satisfatórios. Não descarta-se, contudo, a reformulação do tempo de retardo de injeção dos bicos, sendo necessário, portanto, fazer simulações variando o tempo de abertura dos gates. Esta ação, apesar de não ser descartada, é paliativa, sendo uma possível solução caso a reestruturação do sistema de refrigeração do molde não resulte em efeitos satisfatórios.

Para melhoria na refrigeração do molde foi proposto a inserção de mais 4 termorreguladores na máquina, afim de melhorar a eficiência da circulação de água, favorecendo, assim, o controle efetivo da temperatura na região do defeito e formação da linha de solda. Para tanto é necessário a presença dos tecnólogos e ferramenteiro para que o atual projeto de refrigeração seja reestruturado. Por se tratar de uma modificação da atual configuração da máquina, demanda-se prazos mais extensos, não sendo possível, portanto, contabilizar as possíveis melhorias nos índices de refugo até a finalização do atual trabalho.

Ainda segundo Manrich (2005), para obter soldas de boa qualidade que não prejudiquem o desempenho da peça é necessário controlar as variáveis do processo. Para tanto, é necessário assegurar “temperaturas adequadas para que as moléculas tenham interpenetração e total enrosco na região do encontro dos fluxos”, garantindo, ainda, pressões capazes de eliminar o ar nesta região. Nessa perspectiva, como proposta futura à empresa, sugere-se a reformulação dos parâmetros do atual projeto do farol GX-65 a partir de estudos estatísticos, aplicando a ferramenta DOE (*Design of Experiments*), avaliando, assim, a influência dos parâmetros de temperatura e pressão na qualidade da solda formada e consequentemente no defeito apontado.

Segundo Montgomery (1991), as técnicas de planejamento e análise de experimentos (*Design of Experiment* – DOE) buscam definir os parâmetros ótimos que regulam o processo de fabricação que resultem em produtos com qualidade assegurada. A ferramenta, quando devidamente aplicada, reduz o número de testes e otimiza o uso de recursos da empresa, tais como material, tempo dos funcionários e disponibilidade das máquinas.

6. CONCLUSÃO

A aplicação das ferramentas 5G e 5W1H, bem como a formação do time foi fundamental para um melhor entendimento do defeito detectado na região da linha de junção, onde se tem a formação de bolha. Com a equipe foi possível realizar um apontamento coerente das possíveis causas, utilizando o diagrama de Ishikawa.

Ao realizar as análises propostas, pôde-se descartar possíveis variações de parâmetros da máquina, temperatura do molde/máquina fora do especificado, sujeira, necessidade de polimento, falhas de usinagem e desbalanceamento do molde, problemas relacionados à método e mão-de-obra e por fim material com umidade e índice de fluidez fora do especificado.

A análise, contudo, indicou duas possíveis causas para o problema de injeção relatado: geometria e refrigeração. A geometria da peça, bem como sua complexidade tendem a dificultar o preenchimento da cavidade do molde, enquanto que a aparência da linha de solda e a bolha na região é um indício de refrigeração ineficiente do molde.

Como alternativas para resolução do problema propõe-se a reformulação da posição do defeito (apontado como bolha de injeção) para regiões não visíveis do carro montado a partir de retardo de injeção entre os *gates*. Melhoria na refrigeração do molde com a inserção de mais 4 termorreguladores na máquina, de modo a melhorar a eficiência da circulação de água e o controle da temperatura na região.

O presente trabalho, portanto, atingiu seu principal objetivo que consistia em desenvolver uma análise crítica e prática de um problema de injeção, aplicando de maneira eficiente os conceitos de WCM e os recursos disponibilizados pela empresa. Além disso, foi possível aplicar os conhecimentos acadêmicos dentro da indústria de injeção na resolução do problema, aprimorando o perfil profissional dentro do setor. Não foi possível avaliar, contudo, o índice de refugo da empresa após a implementação das melhorias, uma vez que o tempo de execução excede o prazo de finalização do trabalho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Não foi possível avaliar o índice de refugo da empresa após a implementação das melhorias, uma vez que o tempo de execução excede o prazo de finalização do trabalho. Tem-se como sugestão para trabalhos futuros a avaliação da efetividade das melhorias empregadas e aplicação de outras ferramentas mais avançadas como DOE para resolução do problema, de modo a atingir a meta de 0 defeitos imposta pela empresa e requisitos WCM.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. M.; BRANCIFORTI, M. C.; BRETAS, R. E. S. Avaliação da orientação molecular de moldados de polipropileno utilizando figuras de pólo obtidas por difração de raios X. **Polímeros**, São Carlos, v. 17, n. 1, p. 28-35, Mar. 2007.

BOTELHO, E. R. S. **Processo de injeção do polímero PEEK aplicado a Espaçadores Intervertebrais**. 2013. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2013.

BRETAS, R. E. S.; D'ÁVILA, M. A. Reologia de Polímeros Fundidos. São Carlos: Edufscar, 2005. 257p.

BUSATO, F. A. **Parâmetros de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes fabricados por estereolitografia com resina SOMOS 7170**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CORAZZA, E. J. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE NITRETAÇÃO EM CAVIDADES DE AÇO P20 DE MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville – Univille, Joinville, 2012.

D'ÁVILA, M. A. **Processo de moldagem por injeção de polímeros semicristalinos: Caracterização e simulação assistida por computador**. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ESTACIO, K. C. **Simulação do processo de moldagem por injeção 2D usando malhas não estruturadas**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Computação e Matemática Computacional, Universidade São Paulo, São Carlos, 2004

DIHLMANN, C. **Simulação e análise do preenchimento de cavidades em moldes para injeção de termoplásticos utilizando método manual e tecnologia CAE/CAD**. 167 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

GILAT, A.; SUBRAMANIAM, V. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas**: Uma introdução com aplicações usando o MATLAB -Tradução. Porto Alegre: Artmed Editora S.a, 2008.

GILL, D. D. **Precision replication of co-molded meso and micro optics through injection molding**. 2012. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanical And Aerospace Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2012.

GRANADA, J. E. **Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção de polímeros**. 2012. 38 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GRANADO, R. M. **Moldagem por injeção de microcomponentes ópticos poliméricos gerados em insertos usinados por torneamento de ultraprecisão**. 2010. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

KENNEDY, P.K. **Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation**. 2008. 155 f. Tese (Doutorado), Technische Universiteit Eindhoven, Melbourne, 2008.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos – Projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.

ILINCA, F.; HÉTU, J. **Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics**. Canadá: Intech, 2010. 440p.

IMAI, M. **Gemba Kaizen: Estratégias e técnicas do Kaizen no piso de fábrica** - São Paulo: IMAM, 1996.

KENNEDY, P.K. **Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation**. 2008. 155 f. Tese (Doutorado), Technische Universiteit Eindhoven, Melbourne, 2008.

LANGHANZ, J. E. **Efeito das condições de injeção do polipropileno nas suas propriedades**. 2012. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LI, Xuejun; GUPTA, Satyandra K. **Geometric algorithms for automated design of rotary-platen multi-shot molds**. University of Maryland, Maryland, USA, 2003.

LI, X; OUYANG, J.; LI, Q.; REN, J. Simulations of a full three-dimensional packing process and flow-induced stresses in injection molding. **Journal Of Applied Polymer Science**, Xian, v. 126, n. 5, p.1532-1545, 13 dez. 2011.

LUCIETTO, D et. al. FERRAMENTAS DA QUALIDADE. **Simpósio Científico FTSG**, Caxias do Sul, out. 2011.

MANRICH, S. Processamento de termoplásticos. São Paulo: Artliber. 2005. 431p.

MONTGOMERY, D. C. Diseño y análisis de experimentos. Trad. Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica, 1991.

MORAES, J. D. **Metodologia 5G para Solução de Problemas**. Betim: Lean Manufacturing, 2013. Color.

NISHIMOTO, A. R. **Simulação numérica da injeção de termoplásticos em moldes**: Estudo comparativos de alguns modelos computacionais. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ÖSTERGREN, A. **Prediction of residual stresses in injection moulded parts**. 2013. 66 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mecânica Aplicada, Departamento de Mecânica Aplicada, Chalmers University Of Technology, Göteborg, 2013.

PETERS, G. W. M.; VELDEN, P.J.L.; MEIJER, H.E.H.; SCHOONE, P. Multilayer Injection Moulding: Part 2: Particle tracking in reactive molding. **International Polymer Processing**, Munich, v. 9, n. 3, p.258-265, jan. 1994. Carl Hanser Verlag.

PINTO, R. J. F. **Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos: Influência da Pressão de Injeção**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2012.

PINTO, Virgínia Bentes. Informação: a chave para a qualidade total. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 22, n. 2, p.133-137, ago. 1993.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber Ten. **Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre, 2012.

RÓRIZ, J. R. C. Perfil 2016. Abiplast, Disponível em: <
http://file.abiplast.org.br/file/download/2017/Perfil_2016_Abiplast_web.pdf >.
Acessado em 21 mar. 2018.

RUBRICH, L.; WATSON, M.; FAYAD, V. **Implementing World Class Manufacturing**. 3. ed. WCM Associates Llc, 2015.

SANTOS, I. M.; BATISTA, F. A. LAYOUT DE ARMAZENAGEM: USO DE METODOLOGIAS DE ARRANJO FÍSICO PARA REDESTRIBUIÇÃO DO ESPAÇO EM UM CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO DE BEBIDAS. **XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. João Pessoa, out. 2016.

SCHONBERGER, R. J. **World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied**. New York, New York. 1986. 253 p.

SILVA, S. L. **SISTEMÁTICA PARA O PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE POLÍMEROS**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

TADMOR, Z; GOGOS, C. G. **Principles of polymer processing**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 982 p.

WAECHTER, F. L. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO SEGMENTO DE ESTEIRA EMBORRACHADA**. 2013. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

ZDANSKI, P. S. B.; V. JÚNIOR, M.; DIAS, A. P. C. Simulação numérica do escoamento de polímeros em uma contração. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, Belo Horizonte, abr. 2009.

ANEXOS

DATASHEET DO FORNECEDOR



LEXAN™ RESIN LS1

REGION AMERICAS

DESCRIPTION

UL rated HB as of 10/97. 200 series recommended when V-2 rating required. Automotive lens applications. Low viscosity. UV-stabilized. Transparent colors only.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20170913

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Tensile Stress, yld, Type I, 50 mm/min	62	MPa	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 50 mm/min	125	%	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	96	MPa	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	2340	MPa	ASTM D 790
IMPACT			
Izod Impact, notched, 23°C	694	J/m	ASTM D 256
Tensile Impact, Type B	472	kJ/m ²	ASTM D 1822
Falling Dart Impact, 23°C	169	J	SABIC method
Instrumented Impact Energy @ peak, 23°C	62	J	ASTM D 3763
THERMAL			
HDT, 1.82 MPa, 6.4 mm, unannealed	129	°C	ASTM D 648
Relative Temp Index, Elec	130	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	125	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	125	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Specific Gravity	1.2	-	ASTM D 792
Water Absorption, 24 hours	0.15	%	ASTM D 570
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm (5)	0.5 – 0.7	%	SABIC method
Melt Flow Rate, 300°C/1.2 kgf	17.5	g/10 min	ASTM D 1238
OPTICAL			
Light Transmission, 2.54 mm	88	%	ASTM D 1003
ELECTRICAL			
Hot Wire Ignition (PLC)	4	PLC Code	UL 746A
High Voltage Arc Track Rate (PLC)	2	PLC Code	UL 746A
High Ampere Arc Ign, surface (PLC)	1	PLC Code	UL 746A
Comparative Tracking Index (UL) (PLC)	2	PLC Code	UL 746A



PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3)	1.47	mm	UL 94
UV-light, water exposure/immersion	F1	-	UL 746C
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	120	°C	
Drying Time	3 – 4	hrs	
Drying Time (Cumulative)	48	hrs	
Maximum Moisture Content	0.02	%	
Melt Temperature	280 – 305	°C	
Nozzle Temperature	275 – 300	°C	
Front - Zone 3 Temperature	280 – 305	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	270 – 295	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	260 – 280	°C	
Mold Temperature	70 – 95	°C	
Back Pressure	0.3 – 0.7	MPa	
Screw Speed	40 – 70	rpm	
Shot to Cylinder Size	40 – 60	%	
Vent Depth	0.025 – 0.076	mm	

DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NONINFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.