



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

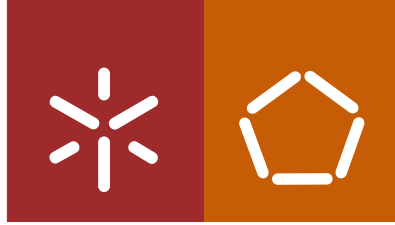
José Carlos Rodrigues Pereira

**Impacto do azoto no processo
de soldadura *reflow***

José Carlos Rodrigues Pereira **Impacto do azoto no processo de soldadura *reflow***

UMinho | 2015

outubro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Carlos Rodrigues Pereira

**Impacto do azoto no processo
de soldadura *reflow***

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Industrial
Ramo de Qualidade, Segurança e Manutenção

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor Paulo Alexandre Costa Araújo Sampaio

DECLARAÇÃO

Nome: José Carlos Rodrigues Pereira

Endereço eletrónico: Carlos.per@sapo.pt Telefone: 915905804

Número do Bilhete de Identidade: 11814353

Título da dissertação:

Impacto do azoto no processo de soldadura *reflow*

Orientador:

Professor Doutor Paulo Alexandre Costa Araújo Sampaio

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado:

Mestrado em Engenharia Industrial, Ramo de Qualidade, Segurança e Manutenção

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

Agradecimentos

A realização deste projeto apenas se tornou possível através da colaboração de um conjunto de pessoas, às quais gostaria de agradecer.

À empresa Delphi pela oportunidade de me permitir realizar este projeto, e muito em particular no seio desta organização ao Jorge Gonçalves e Manuel Joaquim Gomes pelo constante apoio, pela imediata disponibilidade e pela incessante transmissão de conhecimentos. Sem esquecer os restantes membros da equipa da Qualidade, Manutenção, Produção e Engenharia SMT.

Ao meu orientador, o professor Paulo Sampaio, pela orientação, pela receptividade e pela motivação que sempre demonstrou para comigo ao longo desta incansável jornada.

Um especial obrigado à Sofia, a minha esposa, pela compreensão, pelos sacrifícios, pelo incentivo, pela amizade e sobretudo pela paciência que demonstrou para comigo consoante foram surgindo os desafios desta jornada compensando a atenção à nossa querida filha Leonor, que foi também ela uma base de motivação para a realização deste projeto. Desta forma reconheço a importância da família como pilares nos projetos de vida. Obrigados meus amores.

Por fim, aos meus familiares e amigos, pelas palavras de incentivo, pelo apoio e pela compreensão das minhas ausências nestes últimos meses.

Muito obrigado a todos. Sem vocês nada disto teria acontecido.

"Ninguém escapa ao sonho de voar, de ultrapassar os limites do espaço onde nasceu, de ver novos lugares e novas gentes. Mas saber ver em cada coisa, em cada pessoa, aquele algo que a define como especial, um objeto singular, um amigo,- é fundamental. Navegar é preciso, reconhecer o valor das coisas e das pessoas, é mais preciso ainda."

Antoine de Saint-Exupery

Resumo

Atualmente as empresas têm de estar organizadas para reagir rapidamente a mudanças estruturais pois cada vez mais os desafios competitivos derivam dos requisitos de qualidade dos produtos, estando estes intimamente associados a práticas internas de melhoria contínua no seio das organizações.

Com o advento da Diretiva RoHS em 2006, que impõe aos estados membros da União Europeia a adoção de um comportamento alinhado com as necessidades de proteção do meio ambiente, surge a necessidade da aplicação de azoto durante o processo de soldadura por *reflow*.

A Diretiva RoHS identifica o chumbo como um elemento nocivo ao meio ambiente, emergindo assim as pastas *Lead-Free* que impõem a utilização de azoto durante o processo de *reflow* como forma de evitar reações químicas nocivas à qualidade da soldadura.

Apesar do azoto ser um gás comum encontrado na atmosfera, com cerca de 78 % do ar que respiramos a consistir em azoto, a utilização deste gás na indústria eletrónica é dispendiosa, emergindo assim a necessidade interna de avaliar a necessidade do azoto no processo de soldadura por *reflow*.

Para a execução deste projeto delineou-se um estudo detalhado de cada uma das variáveis do processo e criou-se um DOE usando um otimizador de resposta, de forma a maximizar o *output* do processo, tendo em conta os critérios de inspeção das normas IPC A-610. Deste modo, estabeleceram-se os parâmetros do processo para cada um dos fatores e as suas tolerâncias, podendo sempre verificar-se o potencial impacto na qualidade.

Com a realização dos desenhos de experiência definidos, e com o contributo de uma equipa multidisciplinar da Delphi, foram alcançados os objetivos traçados para a realização deste projeto na empresa em questão sem se verificar qualquer impacto na qualidade. O consumo médio diário de azoto teve uma redução de sensivelmente 30%, refletindo-se assim, na diminuição dos custos de produção, tornando a empresa mais competitiva no mercado.

Palavras-chave: Reflow, Lead-Free, Azoto, RoHS, DOE

Abstract

Currently companies have to be organized to respond quickly to structural changes as more and more competitive challenges derived from the product quality requirements, and these are closely associated with the internal practices of continuous improvement within organizations.

With the advent of RoHS Directive in 2006, which requires EU member states to adopt a behavior aligned with the environmental protection requirements, the need arises to apply nitrogen during the convection soldering process.

The RoHS Directive identifies lead as a harmful element to the environment, therefore emerges the Lead-Free solders paste that make the use of nitrogen during the reflow process necessary to avoid risky chemical reactions to soldering quality.

Although nitrogen is a common gas found in the atmosphere, about 78% of the air we breathe consists in nitrogen, the use of this gas in electronics industry is expensive, thus emerges the need to assess the impact of nitrogen in the reflow soldering process.

For the implementation of this detailed study, was outlined a design with controllable process variables and created a DOE using a response optimizer, to maximize the output of the process, taking into account the inspection criteria of IPC A-610 standards. Thus, it was established the process window for each one of the factors and their tolerances with possibility to check the potential impact on quality.

With the achievement of the defined design of experiments, and with input from a multidisciplinary team of Delphi, the objectives set for the conclusion of this project succeeded without any impact on quality. The daily average consumption of nitrogen decreased around 30%, reflecting thus the reduction of the monthly production costs, making the company more competitive in the market.

Keywords: Reflow, Lead-Free, Nitrogen, RoHS, DOE

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Tabelas.....	XI
Lista de Abreviaturas e Siglas	XIII
1 – Introdução	1
1.1 – Fundamentação Teórica.....	1
1.2 - Motivação	3
1.3 - Objetivos	3
1.4 – Metodologia de Investigação	4
1.5 – Estrutura.....	4
2 – Revisão de Literatura (DOE)	7
3 – Estudo de caso.....	11
3.1 - A Empresa: Delphi Automotive Systems Portugal	11
3.1.1 - Caracterização da Fábrica de Braga	13
3.1.2 - Caracterização dos Recursos Humanos	14
3.2 - Processo Produtivo	16
3.2.1 – Edifício 2 - Plásticos	16
3.2.2 - Edifício 1 - Eletrónica.....	18
3.3 - Processo SMT	21
3.3.1 - Breve descrição do processo de produção SMT	22
3.4 - Linha de Montagem Automática	24
3.4.1 – Impressão de pasta de solda.....	24
3.4.2 – Processo de Montagem de componentes (Pick&Place)	31
3.4.3 - Inspeção automática de soldadura: AOI	36
3.5 - FTQ: Real DPM	37
3.6 – Gestão da Qualidade	38
3.6.1 - Fluxogramas	40
3.6.2 - Diagrama de causa-efeito	40
3.6.3 - Análise de Pareto	42
3.6.4 - Histogramas	42

3.6.5 - Folhas de verificação ou check-list.....	43
3.6.6 - Gráficos de dispersão.....	44
3.6.7 - Gráficos de controlo.....	44
3.7 – DOE – Caso Prático.....	45
3.7.1 – DOE – Caso Prático I.....	45
3.7.2 - DOE – Caso Prático II.....	50
4 – Descrição do Problema.....	53
4.1 – Soldadura Lead-Free.....	53
4.2 - Diretiva RoHS.....	54
4.3 - Azoto.....	55
5 - Trabalho Desenvolvido.....	57
5.1 - Impacto do Azoto no processo de Soldadura Reflow: Screening DOE.....	57
5.1.1 - Avaliação de resultados.....	60
5.1.2 - O resultado Qualitativo AOI (FTQ).....	60
5.1.3 - A coalescência da solda dos BGA`s.....	61
5.1.4 - Observações do movimento do fluxo.....	64
5.1.5 - Soldadura dos QFN`s.....	65
5.2 - Impacto do Azoto no processo de Soldadura Reflow: DOE II.....	67
5.2.1 - Avaliação de resultados.....	72
5.2.2 - O resultado Qualitativo AOI.....	72
5.2.3 - A coalescência da solda dos BGA`s.....	72
5.2.4 - Soldadura dos BGA`s (<i>voids</i>).....	75
6 - Conclusões e Considerações Finais.....	79
6.1 - Enquadramento.....	79
6.2 - Conclusão.....	79
6.3 - Limitações.....	81
6.4 - Desafios Futuros.....	81
7 - Bibliografia.....	83

Índice de Figuras

Figura 1: Delphi no Mundo	11
Figura 2: Delphi na Europa	12
Figura 3: Portfolio de Clientes Delphi	13
Figura 4: Distribuição dos Cliente (2015)	14
Figura 5: Distribuição dos Operadores Delphi	14
Figura 6: Distribuição por antiguidade na Empresa	15
Figura 7: Espaço fabril da Delphi Braga	16
Figura 8: Processo dos plásticos	17
Figura 9: Esquema do processo de pintura	17
Figura 10 - Esquema do processo de montagem final.	18
Figura 11: Fluxo de Produção Edifício 1	18
Figura 12: Esquema do processo de Montagem Automática.....	19
Figura 13: Processo de Montagem Manual	20
Figura 14: Fonte: IPC A-610- Principais componentes de Stick Lead	20
Figura 15 - Esquema do processo de Montagem Final	21
Figura 16: Fluxograma do Processo de SMT	23
Figura 17: Fluxo do processo de SMT	24
Figura 18: Processo de deposição de pasta de solda	25
Figura 19: Fórmula de cálculo do <i>release ratio</i> (Cookson)	26
Figura 20: Cookson Eletronics: Imagem ampliada dos tipos de pasta de solda 3 e 4.....	27
Figura 21: Medições em 3D (máquina KohYoung)	28
Figura 22: Formas de deposição de pasta de solda	29
Figura 23: Critérios de área impressa	29
Figura 24: Critérios de Offset da posição de pasta (aceitáveis).....	29
Figura 25: Critérios de deposição de pasta de solda (defeito)	30
Figura 26: Critério de deposição de pasta de solda (Curto).....	30
Figura 27: Critérios de altura da pasta de solda	30
Figura 28: Output SPC em tempo real (PCI, Histogramas, gráficos de controlo Cpk)	31
Figura 29: Processo de Coleta de componentes (ASM)	32
Figura 30: Processo de inspeção de componentes (ASM).....	32
Figura 31: Pipetas de coleta de material (ASM)	33
Figura 32: IPC A-610: Componentes SMT	34
Figura 33: Exemplo de imagem de Inspeção da AOI - Manual Viscom	37
Figura 34: Gráfico de Pareto- Manual de formação DPS da Delphi	42
Figura 35: Histograma- Manual de formação DPS da Delphi.....	43
Figura 36: Folha de verificação (Fonte: (Montgomery, 2009))	43

Figura 37: Gráfico de dispersão (Fonte: (Montgomery, 2009))	44
Figura 38: Gráfico de Controlo-Manual de formação DPS da Delphi	45
Figura 39: Perfis da estufa Reflow otimizados	46
Figura 40: Descentramento do Componente	47
Figura 41: Descentramento da Pasta.....	47
Figura 42: Fonte: Requisito Classe 2 IPC A610 para altura do menisco de soldadura.....	48
Figura 43: Fonte: Requisito Classe 3 IPC A610 para altura do menisco de soldadura.....	49
Figura 44: Requisitos gerais IPC A610 para altura do menisco de soldadura	49
Figura 45: Coalescência da Solda	49
Figura 46: Soldadura de QFN	50
Figura 47: Fonte: IPC 7095: Requisito para Classificação de <i>Voids</i>	52
Figura 48: Exemplo Soldadura PB	53
Figura 49: Exemplo de Soldadura Lead Free	54
Figura 50: Placa de teste SEP010 ADP	59
Figura 51: Diferentes tamanhos de componentes avaliados	59
Figura 52: Soldadura QFN	60
Figura 53: Soldadura 0402.....	61
Figura 54: Resultados da Soldadura- Coalescência	62
Figura 55: Percentagem de <i>Pad</i> 's coalescidos	63
Figura 56: <i>Pad</i> 's coalescidos entre pastas e ambiente.....	63
Figura 57: <i>Pad</i> 's coalescidos - relação entre fatores	64
Figura 58: Design de QFN.....	65
Figura 59: Soldadura de QFN	66
Figura 60: Soldadura QFN – relação entre fatores.....	66
Figura 61: Soldadura sem Azoto - Avaliação de Risco	67
Figura 62: MSA às leituras de O2.....	70
Figura 63: Relatório das leituras de O2.....	71
Figura 64: Soldadura de condensador 0402.....	72
Figura 65: Plot de Relação entre fatores e coalescência.....	73
Figura 66: Multi-Vari de Coalescência por <i>Pad</i> e Concentração de Azoto.....	74
Figura 67: Observação gráfica da Coalescência.....	74
Figura 68: <i>Design</i> de BGA 544 (Texas Instruments).....	75
Figura 69: MSA <i>Voids</i> by Operator	76
Figura 70: % <i>Void</i> por PPM's e operador.....	76
Figura 71: Cortes metalográficos BGA's	77
Figura 72: Consumos de Azoto por estufa.....	80

Índice de Tabelas

Tabela 1: Designação standard consoante dimensão do SMD	34
Tabela 2: Pontos de <i>reflow</i> entre pastas com chumbo (SnPb) e Lead Free.....	35
Tabela 3: Autores e contribuições para o TQM	39
Tabela 4: Desenho de experiências	58
Tabela 5: Níveis de Ruído no DOE.....	58
Tabela 6: DOE Fatores e Níveis.....	68
Tabela 7: Valores MSA das leituras do O2	69

Lista de Abreviaturas e Siglas

- AOI - Inspeção Óptica Automática (*Automatic Optical Inspection*);
- BGA – “*Ball Grid Array*” - Encapsulamento para componentes eletrônicos;
- CEP - Controle Estatístico de Processo;
- DMAIC – Metodologia Seis Sigma de melhoria contínua (*Define, Measure, Analyse, Improve, Control*);
- DOE – Desenho de Experiências (*Design of Experiments*);
- DPM - Defeitos por Milhão de Oportunidades (*Defects per Million Opportunites*);
- ENIG – “*Electroless Nickel Immersion Gold*”- Acabamento em Níquel / Ouro para placas de circuito impresso;
- FIFO – “*First in First Out*”;
- FMEA - Análise dos Modos de Falhas do Processo e seus Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis*);
- GR&R – Repetibilidade e Reprodutibilidade de Instrumentos (*Gage Repeatability and Reproducibility*);
- HASL ou HAL – “*Hot Air Solder Leveling*” - Acabamento final de placa de circuito impresso com aplicação de Sn/Pb ou Sn/Ag/Cu pelo processo de imersão com ar quente;
- ICT - Teste em Circuito (*In-Circuit Test*);
- IPC – “*Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*” - Instituto de interconexões e encapsulamento de circuitos eletrônicos;
- JIT – “*Just in Time*”;
- Lead-Free – Pasta de solda sem Chumbo;
- MSA – Measurement System Analysis
- OSP – “*Organic Solderability Preservative*” - Acabamento Orgânico para placas de circuito impresso;
- PB – Pasta de solda com Chumbo;
- PCI – Placa de Circuito Impresso;

Pick&Place – Tecnologia de operação de máquina;

QFN – “*Quad Flat No Leads*” - Encapsulamento para componentes eletrônicos;

QFP – “*Quad Flat Package*” - Encapsulamento para componentes eletrônicos;

Reflow – Soldadura por *reflow* ou convecção;

RoHS – “*Restriction on the use of Hazardous Substances*” - Norma Europeia para a restrição do uso de metais pesados “

SMD – “*Surface mount device*” – Dispositivo para montagem de superfície;

SMT – “*Surface mount technology*” – Tecnologia de montagem de superfície;

SPI - Inspeção de pasta de solda (*Solder Paste Inspection*);

THT - Tecnologia Através de Furo (*Through-Hole Technology*);

TQM – Total Quality Management;

WEEE – “*Waste Electrical and Electronic Equipment*”- Norma relativa ao desperdício gerado pelos equipamentos eletroeletrônicos;

X-Ray - Inspeção Raio-X Automática (*Automatic X-ray Inspection*);

1 – Introdução

Atualmente as organizações têm de estar organizadas para reagir rapidamente a mudanças pois cada vez mais os desafios competitivos derivam dos requisitos da qualidade dos produtos associados a práticas internas de melhoria continua no seio das organizações para a manutenção da vantagem competitiva sobre a concorrência.

O azoto é um gás utilizado para homogeneizar a atmosfera da soldadura *reflow*, contudo, os níveis utilizados para a soldadura são os estabelecidos em 2004 pelas diretrizes Delphi. Com a evolução tecnológica das estufas de soldadura e dos compostos das pastas de solda usadas no processo, torna-se pertinente avaliar estes consumos e o impacto da utilização de diferentes níveis de azoto na soldadura por *reflow*.

1.1 – Fundamentação Teórica

A dissertação apresentada neste documento insere-se em contexto industrial de produção automática de componentes eletrónicos e visa o estudo do impacto do azoto no processo de soldadura por “*reflow*” ou convecção.

Como salientado por Goosey (2005), o desenvolvimento de inúmeras questões de foro ambiental tem levantado muitas preocupações, resultou na abolição de determinadas substâncias perigosas, entre elas, o chumbo (Shu, Hsu, & Hu, 2012). Muita pesquisa já foi realizada para definir composições viáveis sem chumbo na pasta de solda (Harrison, Vincent, & Steen, 2001). Com a emergência das pastas de solda sem chumbo surge a necessidade de elevar as temperaturas das estufas *reflow* para assim conseguir uma soldadura que vá de encontro aos critérios normativos que regulam a indústria eletrónica que serão mais tarde desenvolvidos neste trabalho.

Takyi & Ekere (2010), no seu estudo sobre o efeito do azoto em ambientes de soldadura *reflow*, ressaltam a necessidade do perfil de *reflow* ser otimizado e os parâmetros do processo mais acompanhados. A utilização do azoto surge como resposta a estas alterações nos processos de soldadura *reflow*. O uso de azoto ajuda a proteger as superfícies da placa, impede a oxidação de

pads, permite uma melhor absorção de solda e, por consequência resultam, soldas mais brilhantes.

Zhong, Arulvanan, & Shi (2005) destacam o facto do azoto gasoso ter uma larga aplicação na indústria, nomeadamente nas indústrias química, alimentar, eletrónica e metalúrgica. O azoto é usado para evitar oxidações e reações químicas indesejáveis durante o processo de soldadura dos componentes, especialmente na soldadura sem chumbo.

Há tendências gerais que favorecem o uso de azoto, como o diminuir do tamanho dos componentes de superfície, o desenvolvimento de componentes de alta densidade e a busca por um acabamento superior em Placas de Circuito Impresso (*PCIs*). Estas mudanças conduziram à inserção do elemento azoto na equação da soldadura *reflow* (Tsai, 2012).

Desta forma, o azoto adquiriu um papel fundamental para as exigências qualitativas das empresas, acarretando com o seu uso um acréscimo dos custos de produção. Para contornar essa situação, surgiram no mercado novas pastas de solda com o intuito de se adaptarem às circunstâncias normativas atuais e assim apoiarem as empresas numa transição para a diminuição do uso de azoto no processo de soldadura *reflow* (Sitek, Rocak, Bukat, Fajfar-Plut, & Belavic, 2004).

O Desenho de Experiências (*DOE*) vai ser a ferramenta utilizada para avaliar o impacto do azoto na soldadura *reflow* devido à complexidade da análise dos resultados obtidos. A metodologia *DOE* permite a conjugação de vários fatores em simultâneo, de forma a ser alcançado o resultado mais fiável em termos financeiros e de eficiência da experiência como referenciado por Antony, Chou, & Ghosh (2003). Neste estudo a utilização desta ferramenta visa o ajuste de diversos fatores controláveis e introdução de fatores de ruído de forma a obtermos o melhor resultado nas variáveis de resposta que vá de encontro às expetativas qualitativas e operacionais em simultâneo.

O *DOE* é uma metodologia estatística utilizada na análise dos problemas de qualidade e da melhoria contínua do desempenho de qualquer processo produtivo reconhecida como um meio eficaz de atingir a excelência na qualidade dos produtos e serviços. Goh (2002) salienta que o uso do pensamento estatístico, bem como a gestão e ferramentas operacionais podem trazer melhorias fundamentais aos processos.

1.2 - Motivação

A administração da empresa em estudo tem a percepção que um dos principais requisitos para o sucesso da organização passa pela qualidade constante dos produtos manufaturados.

Contudo, os elevados custos da aplicação de azoto na soldadura por *reflow* tem um impacto considerável na fatura de consumíveis da empresa, e dessa forma, nasce a necessidade de um projeto que avalie a necessidade destes consumos para a formação de uma soldadura robusta e com elevado grau de durabilidade e fiabilidade.

Esta visão é apoiada por uma estrutura de trabalho em ambiente *LEAN* que visa eliminar os desperdícios, de forma a obter os melhores resultados de soldadura com os menores consumos de azoto para o efeito.

1.3 - Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é estudar e analisar a necessidade e o impacto da aplicação do azoto na soldadura sem chumbo.

Para tal serão desenvolvidos os seguintes esforços específicos no decorrer desta investigação:

- Esclarecer a necessidade do estudo da aplicação do azoto no processo de soldadura *reflow*;
- Descrever os critérios de aceitação de soldadura *reflow*, com base nas normas de soldadura internacionais IPC610 que regulam a qualidade de soldadura na indústria eletrónica;
- Identificar ou caracterizar quais os parâmetros de processo e fatores controláveis e respetivos níveis que são influentes para as variáveis de resposta;
- Conduzir um desenho de experiências controlado que identifique os fatores principais e as suas interações de forma a indicar os níveis ótimos para cada uma dessas variáveis;
- Com esta definição, conduzir um "*trial run*" final para validar os resultados inicialmente obtidos.

1.4 – Metodologia de Investigação

O Método de Estudo de Casos é um método utilizado na investigação, quer seja de cariz qualitativo ou quantitativo, e tem as suas origens nas áreas da Antropologia e da Sociologia. Segundo Yin (1994) este método é indicado quando as questões de investigação colocadas são do género “como?” ou “porquê?”, o investigador detém pouco controlo sobre os eventos a estudar e o foco e da investigação são os fenómenos presentes com contextos reais. Tem sido comum a sua utilização em diversas áreas como Psicologia, Sociologia, Ciência Política, Gestão, Economia e Medicina.

Já Zucker (2009) define o estudo de caso como um termo guarda-chuva para uma família de métodos de pesquisa cuja principal preocupação é a interação entre fatores e eventos. Estes estudos de campo são investigações de fenómenos à medida que ocorrem, sem qualquer interferência significativa do investigador.

Segundo Yin (1994), a metodologia de Estudo de Casos baseia-se na utilização de múltiplas fontes de evidências como a observação direta, a análise documental, entrevistas, arquivos, artefactos físicos.

1.5 – Estrutura

O presente trabalho inicia com a revisão bibliográfica em que será salientada a evolução das variáveis pertinentes para o objeto de estudo. Será caracterizado o processo de soldadura *reflow* de forma a compreendermos todo o contexto do projeto e como este pode ser estudado utilizando o Desenho de Experiências;

No capítulo seguinte procederemos à caracterização do ambiente industrial da DASP, empresa na qual se aplicou esta investigação, descrevendo os passos e processos pertinentes para a elaboração deste estudo, assim como a descrição quer dos fatores controláveis e de ruído, quer dos requisitos das variáveis de resposta.

Seguidamente será abordada a contextualização histórica da necessidade de aplicação de azoto na soldadura *reflow* e qual a motivação para a otimização de consumo deste recurso.

No capítulo de trabalho desenvolvido serão expostos quais os fatores que potencialmente afetam a variável de resposta. Procederemos com a explicação do trabalho efetuado em ambiente de produção através da aplicação da ferramenta estatística de Desenho de Experiências, avaliando os resultados das diversas experiências através da análise das variáveis de resposta.

Nas conclusões serão compartilhadas as lições aprendidas ("*Lessons Learned*") com este estudo ressaltando os resultados, mas ainda as limitações e necessidades de estudos futuros.

2 – Revisão de Literatura (DOE)

Neste capítulo será feita uma resenha da ferramenta estatística DOE e a sua importância para a gestão da qualidade industrial e melhoria contínua.

A importância que a qualidade do produto adquiriu, nos nossos dias, é inquestionável e as empresas estão cada vez mais conscientes de que daí residirá o seu sucesso. O Desenho ou Planeamento de Experiências é uma técnica estatística utilizada na análise dos problemas de qualidade e da melhoria contínua do desempenho de qualquer processo produtivo visando a melhoria contínua como referido por Castro (1999).

A primeira abordagem sobre o assunto foi efetuada por R.A. Fisher nos meados do século transato, em Inglaterra, com enfoque na resolução de problemas relacionados com a agricultura. Antony et al. (2003) realçam o facto do crescimento desta após os anos 20 em que foi comumente utilizada para entender determinados fenómenos com a estratégia de investigação de um sistema complexo variando um fator ou variável de cada vez, fixando outro como constante. Antony et al. (2003) definem esta primeira abordagem como OFAT (*one-factor-at-a-time*), em formato de teste e erro, onde é exigida uma mistura de sorte, experiência e intuição para o sucesso.

Para além de dominar a metodologia estatística necessária para o planeamento e para a análise dos dados, o pesquisador deve conhecer rigorosamente os objetos de estudo, como obter os dados, bem como ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados. Também é desejável, sempre que possível, o estabelecimento de um modelo físico-matemático que estabeleça funções que relacionem as diversas variáveis influentes no processo com os resultados que se deseja analisar.

Seguidamente é desejada a elaboração de um modelo físico-matemático, mesmo que aproximado, possibilita um desenho experimental mais dirigido, definindo-se valores de estudo adequados para as variáveis, reduzindo desta forma o número de ensaios.

Montgomery (2007) indica um procedimento para o desenho de experiências e para a análise dos resultados na indústria:

- Reconhecimento e definição do problema, como discutido no parágrafo anterior, que em grande parte depende da experiência já adquirida no estudo de processos semelhantes.

Um produto pode ter uma ou mais características de qualidade observáveis. Algumas das variáveis do processo são controláveis, enquanto outras são não controláveis. Algumas vezes, esses fatores não controláveis são chamados de fatores de ruído. Todas essas características devem ser analisadas para o planejamento da experiência, incluindo ainda a especificação do objetivo do estudo;

- Escolha das variáveis ou fatores de influência e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas, definindo-se o nível específico (valor) que será empregado em cada ensaio. Deve-se verificar como essas variáveis serão controladas nos níveis escolhidos e como eles serão medidos. A avaliação intensiva de diferentes variáveis pode ser necessária quando o estudo encontra-se nos seus estágios iniciais e não se possui uma experiência anterior, exigindo a avaliação das variáveis em diversos níveis. Quando deseja-se verificar a influência de uma variável em particular, o número de níveis deve ser reduzido, além de manter-se as demais variáveis influentes em níveis tão constantes quanto possível.
- A escolha adequada da variável de resposta, de modo a que se garanta a objetividade na análise dos resultados obtidos. O critério principal para essa escolha é de que o erro experimental de medida da variável de resposta seja mínimo, permitindo a análise estatística dos dados, com um número mínimo de réplicas. Sabemos que o desenho de experiências se baseia num sistema de testes no qual são feitas mudanças proposítas nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta. Daí a extrema importância do conhecimento do processo de forma a obter o resultado mais fidedigno desejado;
- Elaboração das experiências: tamanho da amostra (número de réplicas), sequência de execução dos ensaios, necessidade de processos aleatórios ou do uso de blocos. Como afirmado anteriormente, a experimentação é um processo iterativo.

Sobretudo em processos complexos, com diversas variáveis influentes, não se deve partir de um conjunto extenso de experiências, que envolvam um grande número de variáveis, estudadas

em diversos níveis. É mais produtivo estabelecer-se um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis, poucos níveis de avaliação), e ir aprendendo sobre o processo e aos poucos, acrescentar novas variáveis e níveis e eliminar as variáveis de processo que não se mostrem influentes. Com essa iniciativa, reduz-se o número total de ensaios e garante-se os recursos para aqueles ensaios realmente importantes, que normalmente não fornecem resultados objetivos nas tentativas iniciais;

- Execução das experiências, monitorizando-os e controlando-os. Essa etapa é extremamente importante pois garante a validade experimental e exige do pesquisador um conhecimento profundo dos instrumentos, equipamentos e métodos de controle e monitorização;
- Análise dos resultados, com o uso de métodos estatísticos, com o intuito de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas e claras. Destaque-se que esses métodos não permitem afirmar se uma dada variável apresenta ou não um determinado efeito: eles apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido;
- Elaboração das conclusões e recomendações a partir da análise dos resultados. As conclusões e recomendações permitirão que decisões sejam tomadas a respeito do processo em estudo. Uma documentação extensa, com o uso de gráficos e tabelas permite que se apresente os resultados obtidos, a análise efetuada, bem como futuras repetições do procedimento utilizado.

Castro (1999) salienta a importância que o planejamento de experiências pode ter nas indústrias ao poderem ser usadas tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas do processo, para melhorar o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não-sensível a fontes externas de variabilidade.

Os métodos de planejamento de experiências podem também ser úteis no estabelecimento do controle estatístico de um processo. Por exemplo, suponha que um gráfico de controle indique

que o processo está fora de controlo, e que o processo tenha várias variáveis de entrada controláveis. A menos que saibamos quais variáveis de entrada são as importantes, poderá ser muito difícil trazer o processo de volta ao controlo. Os métodos de planeamento experimental podem ser usados para identificar essas variáveis influentes do processo.

O planeamento de experiências é uma ferramenta de engenharia importante para melhorar um processo de fabricação, mas tem também extensiva aplicação no desenvolvimento de novos processos (Jones, 2011).

Montgomery (2009) defende que a aplicação dessas técnicas bem cedo no desenvolvimento do processo pode resultar em:

- Produção aperfeiçoada;
- Variabilidade reduzida e conformidade mais próxima da nominal;
- Tempo de desenvolvimento reduzido;
- Custos totais reduzidos.

No planeamento de novos processos os benefícios são:

- Avaliação e comparação de configurações de planeamento básicas;
- Avaliação de materiais alternativos;
- Determinação dos parâmetros-chave do planeamento do produto que têm impacto sobre o desempenho.

3 – Estudo de caso

Neste capítulo será feita a descrição da empresa onde foi aplicado este projeto de melhoria, assim como, a contextualização do ambiente industrial, processos e variáveis pertinentes ao objeto de estudo.

3.1 - A Empresa: Delphi Automotive Systems Portugal

Nesta secção é apresentada a empresa onde se realizou o projeto de investigação com foco no processo onde se realizou o estudo do impacto do azoto na soldadura *reflow*.

A Delphi Automotive Systems – Portugal S.A pertence ao grupo Delphi, sediado nos Estados Unidos da América, na Cidade de Troy. O grupo está presente em 33 países diferentes, empregando aproximadamente 164 mil colaboradores distribuídos como representado na Figura 1e na Figura 2.

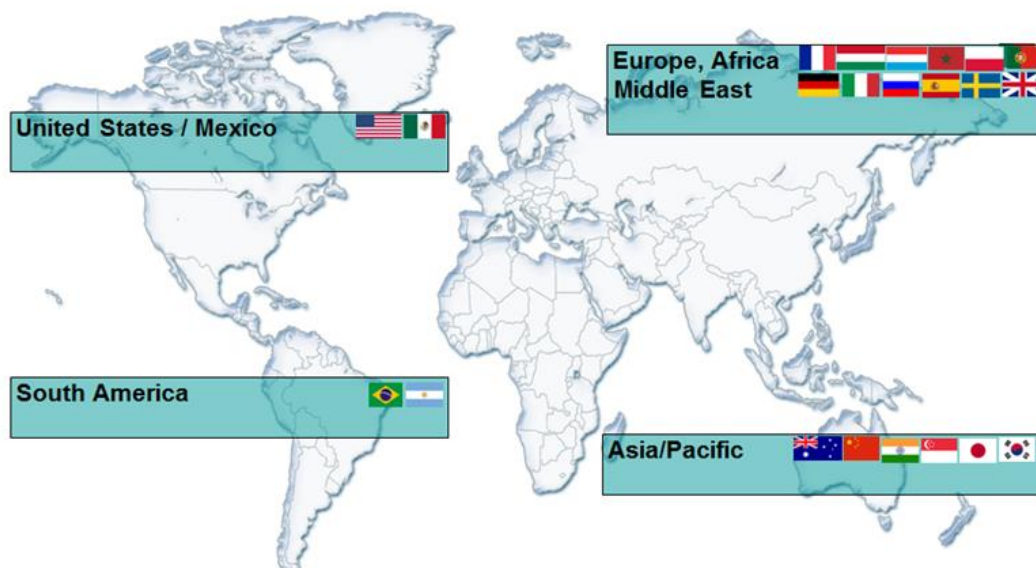


Figura 1: Delphi no Mundo

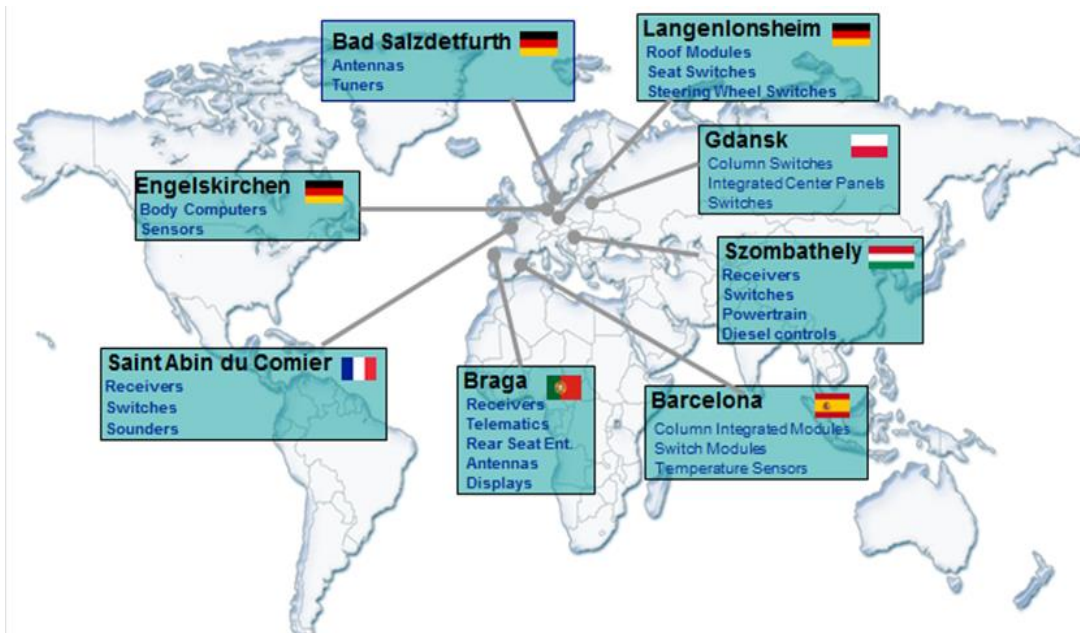


Figura 2: Delphi na Europa

A Delphi Automotive Systems-Portugal, S.A. – Fábrica de Braga começou por ser Grundig, tendo sido adquirida pela Delphi em 2003.

A história da Grundig, na altura designada por “Radio Vertrieb Fürth”, iniciou a sua atividade industrial em Portugal em Novembro de 1965, produzindo, na sua fábrica de Braga, o primeiro aparelho de rádio, um “Transonette 60^a”. A empresa conquistou, subitamente, reputação com o desenvolvimento do legendário recetor de rádio com grande sucesso no mercado “Heinzelmann”. Dez anos mais tarde, a Grundig seria o maior fabricante de rádios na Europa, com mais de 10 000 colaboradores e um milhão de aparelhos vendidos, tornando-se, ao longo dos anos, com os seus desenvolvimentos pioneiros, um nome chave na eletrónica de consumo.

Entre 1990 e 1991 observou-se uma explosão no mercado da procura tendo sido este contrariado no ano 1996, ano em que a Grundig abrandou os seus resultados. Consequentemente, a Philips abandonou a sua liderança industrial no grupo Grundig, no final desse ano. Com a reaquisição da sua independência, a Grundig, redefiniu as suas metas e objetivos, concentrando-se no mercado Europeu.

3.1.1 - Caracterização da Fábrica de Braga

A Delphi Automotive Systems Portugal – Fábrica de Braga é uma empresa especializada no fabrico de autorrádios para a indústria automóvel. Atualmente, tem aproximadamente 700 colaboradores em instalações com uma área total de 42 000 metros quadrados, dos quais 30 000 metros quadrados correspondem a edifícios cobertos.

O grupo Delphi é um dos maiores fabricantes de componentes automóveis do mercado europeu sendo que, a maior parte do volume de produção dos recetores são oriundos da produção da Delphi de Braga. Os principais clientes são o grupo VW (Volkswagen, Audi, Seat e Skoda), a General Motors (Opel / Vauxhall), o grupo Fiat (Fiat e Lancia) a Daimler-Chrysler, a Magneti Marelli, a Ford e a Volvo (Figura 3).



Figura 3: Portfolio de Clientes Delphi

A Delphi de Braga produz mais de 1,4 milhões de autorrádios e 3,2 milhões de antenas por ano e é detentora da certificação ISO 9001 (Certificação de Sistemas de Gestão da Qualidade), conseguida em 1994, da certificação ISO/TS 16949 (certificação de Sistemas de Gestão da Qualidade para a indústria automóvel) e ISO 14001 (certificação de Sistemas de Gestão Ambiental) obtidas em 2001.

O atual programa de produção da fábrica de Braga inclui autorrádios, antenas e sistemas de comunicação, navegação e entretenimento para a indústria automóvel. Na Figura 4 é possível observar a evolução do volume de produção entre 2004 e 2011. Destaca-se aqui o início da produção de antenas em 2009 na fábrica de Braga com o cliente BMW.

Customer	Products	Revenue	Customer Portfolio
VW GROUP	Infotainment Displays	69%	
FIAT GROUP	Infotainment Displays	7%	
VOLVO TRUCK	Infotainment	7%	
FORD GROUP	Reception systems	5%	
GMIO	Infotainment Displays	4%	
PSA	Infotainment ICP	3%	
VOLVO CAR	Recep. Syst. Displays	1%	
BMW GROUP	Reception systems	1%	
OTHERS	Infotainment Recep. Syst.	4%	

Figura 4: Distribuição dos Cliente (2015)

3.1.2 - Caracterização dos Recursos Humanos

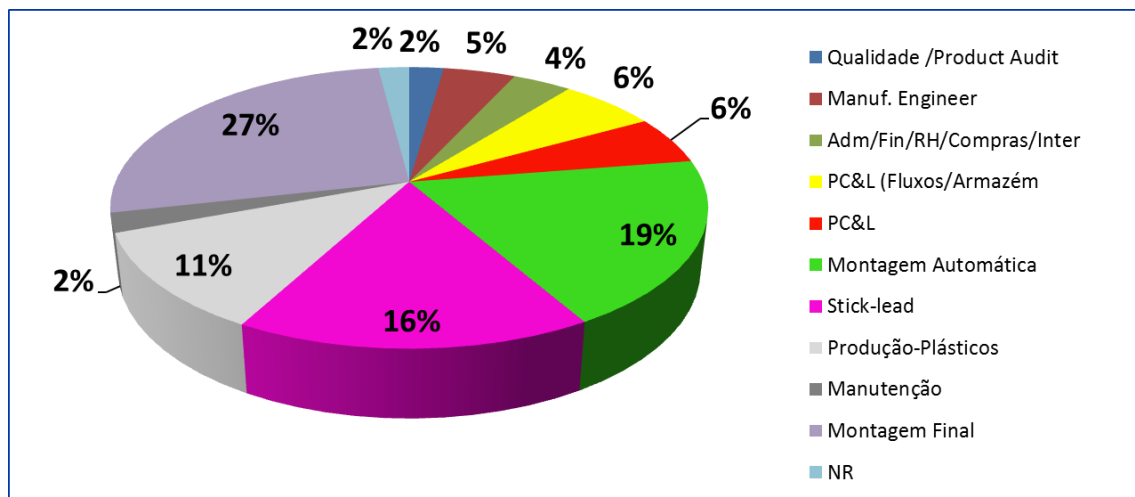


Figura 5: Distribuição dos Operadores Delphi

Na Figura 5 verifica-se que a secção com mais operadores é a secção de Montagem Automática onde se vai realizar o estudo pertinente para esta dissertação.

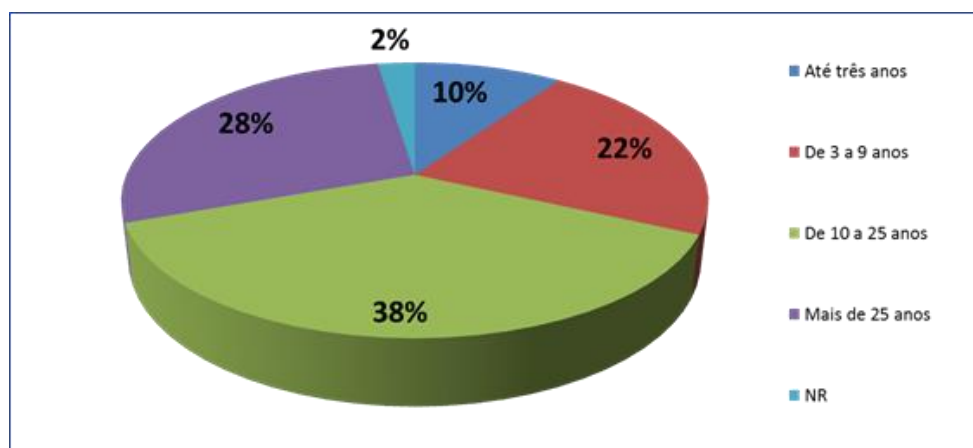


Figura 6: Distribuição por antiguidade na Empresa

Como representado na Figura 6, 38% dos colaboradores estão na empresa de 10 a 25 anos, há mais de 25 anos estão 28%. Na amostra 22% estão de 3 a 9 anos na Delphi. Apenas 10% dos colaboradores estão até três anos na empresa.

Na Delphi de Braga 59,5% são mulheres e 40,5% são homens. Contabilizando toda a fábrica de Braga, a média de idades dos trabalhadores situa-se, aproximadamente, nos 41 anos, podendo encontrar-se praticamente toda a gama de idades da população ativa.

Por sua vez, a área de produção dos Plásticos (Edifício 2), tem 104 trabalhadores, na sua totalidade, sendo que destes 56,7% são mulheres e 43,3% são homens. A média de idades dos trabalhadores deste edifício está significativamente abaixo da média de idades da fábrica na sua totalidade, sendo esta de 33 anos.

A melhoria contínua é um dos focos de maior envolvimento na Delphi. Dessa forma, na prossecução de liderança de mercado, a Delphi, a nível mundial, criou um grupo denominado I&CIM (Inovação e Melhoria Contínua) para liderar este processo de transformação, onde Braga se encontra também representado. A Delphi Braga estabeleceu o seguinte desafio: tornar a fábrica e os seus colaboradores os líderes europeus de implementação do 6 sigma.

Centrada nesta estratégia, em Braga, a equipa de Melhoria Contínua, socorre-se de um leque abrangente de recursos: 70 *Green Belt*, 3 *Black Belt* e um *Master Black Belt*.

3.2 - Processo Produtivo

A empresa possui atualmente quatro edifícios representados graficamente na Figura 7, perfazendo uma área total de aproximadamente 17 mil metros quadrados, sendo cerca de 10 mil metros quadrados respetivos à área de produção, divididas em duas áreas produtivas, uma no edifício 1, onde são produzidos os componentes elétricos, e outra no edifício 2, onde são produzidas peças plásticas.

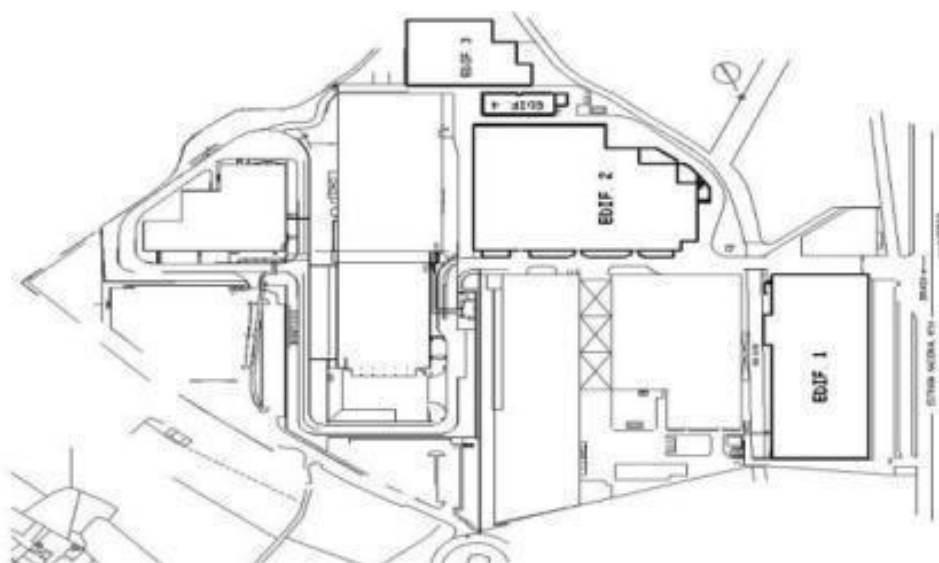


Figura 7: Espaço fabril da Delphi Braga

3.2.1 – Edifício 2 - Plásticos

O processo produtivo do Edifício dos Plásticos está dividido em três etapas principais, representadas esquematicamente na Figura 8.

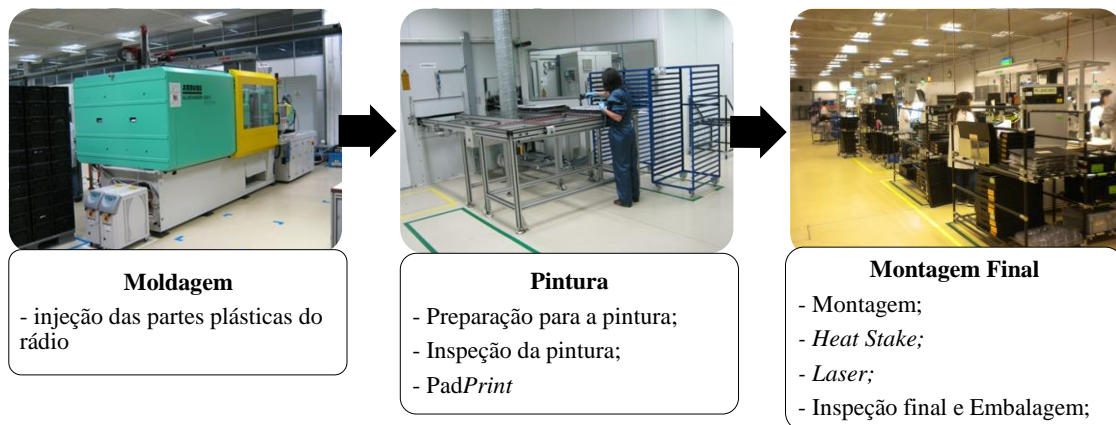


Figura 8: Processo dos plásticos

Genericamente, o processo inicia-se com a Moldagem onde, nas máquinas de injeção, é realizada a injeção das partes plásticas do rádio, com a utilização dos moldes adequados. De seguida essas peças passam para o processo de pintura, esquematizado na Figura 9, sendo este iniciado com uma preparação para a pintura onde todas as peças são analisadas e, caso necessário, limpas. Posteriormente sofrem uma pintura em máquinas de pintura automática e secagem em fornos. Este processo tem ainda as etapas de inspeção dos produtos pintados onde todas as peças pintadas produzidas são inspecionadas e o *Pad Print* onde ocorre a impressão a tinta de caracteres em algumas das peças.

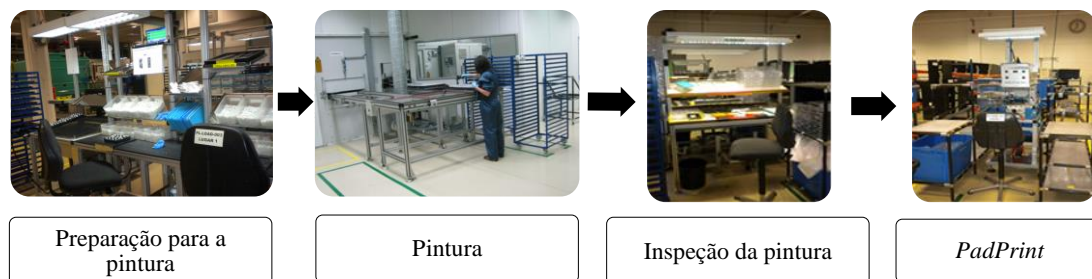


Figura 9: Esquema do processo de pintura

Por fim, existe o processo de Montagem Final, esquematizado na Figura 10, que engloba as etapas: montagem, onde se processa a montagem dos botões e da blenda, *heat stake* onde ocorre a agregação dos componentes da blenda, através da junção a alta temperatura; laser onde se processa a gravação dos botões da blenda (através de remoção da tinta por ação de um

laser); e, por fim, a inspeção final e embalagem, na qual ocorre a filtragem das peças com defeito que possa ter passado na inspeção da pintura ou que possa ter surgido durante o processo.



Figura 10 - Esquema do processo de montagem final.

3.2.2 - Edifício 1 - Eletrônica

O processo produtivo do Edifício 1 representado na Figura 11 está dividido em três etapas fundamentais:

- Inserção Automática de Componentes (Montagem Automática), que inclui a aplicação de pasta de solda e cola;
- Montagem Manual, que inclui processos de soldadura;
- Montagem Final, que inclui teste, controlo e embalagem.

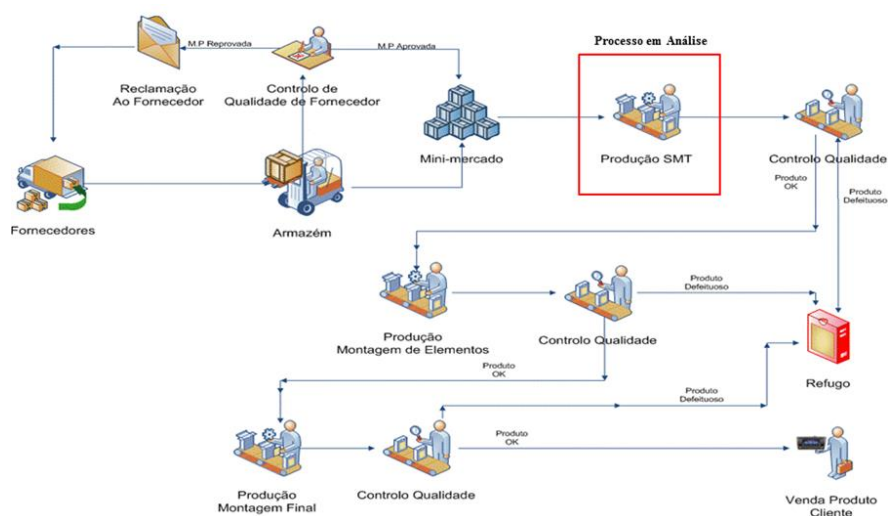


Figura 11: Fluxo de Produção Edifício 1

O processo de Montagem Automática engloba cinco etapas distintas, representadas na Figura 12. Este processo tem início com a gravação a Laser de um código de barras identificativo do produto na PCI, identificação única que servirá como elemento essencial de rastreabilidade ao longo do processo e para o cliente final. Seguidamente, inicia-se o processo de deposição de pasta de solda com a colocação de pasta de solda numa placa de circuito impresso através de uma tela perfurada, sendo aplicada pasta de solda na parte superior da tela que deposita, através da perfuração, na placa de circuito impresso. Seguidamente, as máquinas de inserção automática colocam componentes do tipo SMD (*Surface Mounting Device*) nas placas de circuito impresso. Após esta etapa, os materiais seguem para uma estufa de endurecimento da pasta de solda ou cola, seguindo finalmente para a fase seguinte. Este processo contempla o projeto em análise e dessa forma, será posteriormente abordado com maior detalhe neste trabalho.

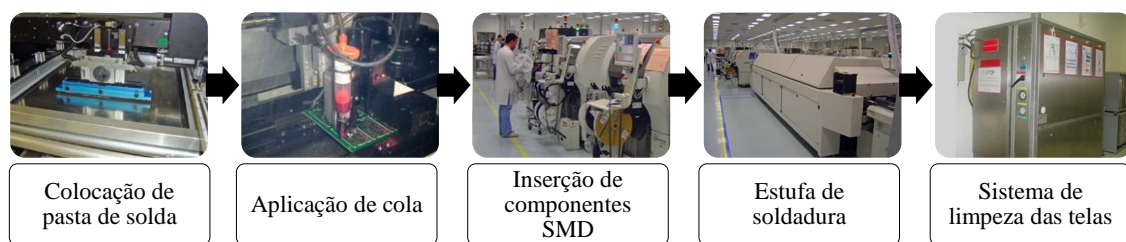


Figura 12: Esquema do processo de Montagem Automática

Posteriormente à montagem automática segue-se o processo de montagem manual. Este engloba três etapas, representadas na Figura 13, sendo elas a inserção manual de componentes, a soldadura por ondas e o processo de revestimento. Numa fase inicial, são inseridos, manualmente em linhas de produção, alguns componentes nas placas de circuito impresso (“produto” gerado no processo de montagem automática). De seguida, as placas de circuitos impressos são alimentadas no processo de soldadura através de um sistema de transporte, processo este que se inicia com a pulverização com fluxo e pré-aquecimento dos PCI. Estes são recolhidos por uma mão robótica, conduzidos sobre uma onda de solda e automaticamente transferidos para fora da máquina. Este processo manual finaliza-se com o processo de revestimento que consiste na cobertura e secagem em estufa das placas eletrónicas com um verniz de proteção contra a humidade.



Figura 13: Processo de Montagem Manual

Neste processo de inserção, os componentes podem ser inseridos automaticamente ou manualmente nos furos da placa. A inserção automática é executada por máquinas, que são alimentadas por fitas contendo componentes THT. Os componentes são recolhidos da alimentação e inseridos automaticamente nos furos da placa. Para a máquina ter uma referência é necessário que a placa possua “furos guias”, (estes furos são posicionados normalmente próximos aos cantos da placa). Entretanto, estas máquinas são capazes de inserir automaticamente os componentes THT dos tipos axiais, radiais e CIs (DIP) representados na Figura 14, sendo que os demais tipos de componentes devem ser inseridos manualmente.

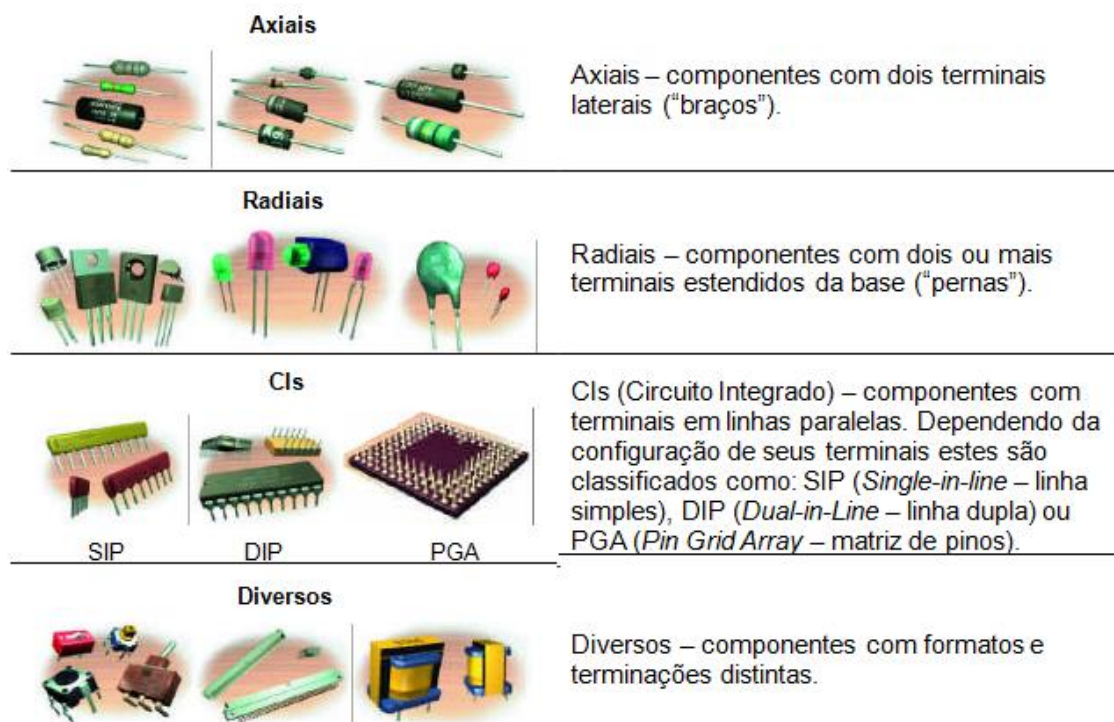


Figura 14: Fonte: IPC A-610- Principais componentes de Stick Lead

Por fim, ocorre o processo de Montagem Final, representado na Figura 15, onde todas as peças são montadas manualmente até ao seu formato final. Após a montagem seguem-se as operações automáticas de afinação, teste e de controlo subjetivo, também conhecido como controlo de cliente. Finalmente, após a etiquetagem e gravação do número no chassis do aparelho, este é embalado e enviado para a expedição. É neste processo que algumas peças plásticas, provenientes da área de injeção e pintura da fábrica de plásticos do edifício 2 são incorporados no processo de montagem.

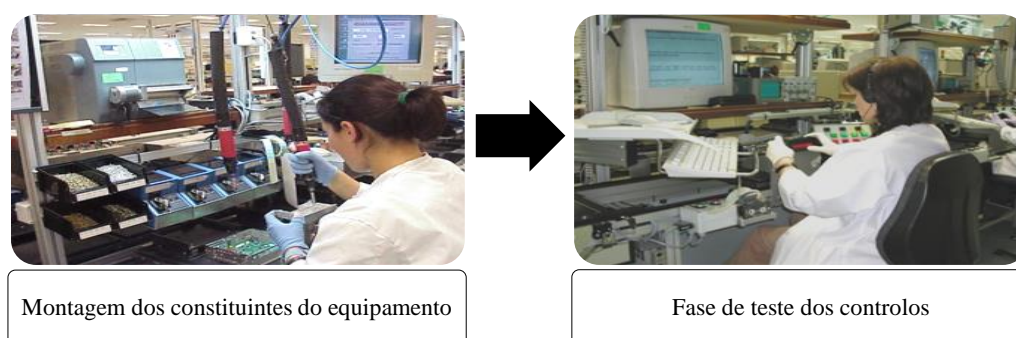


Figura 15 - Esquema do processo de Montagem Final

3.3 - Processo SMT

O processo de montagem estudado nesta dissertação é o processo de SMT (*Surface Mount Technology* – Tecnologia de montagem em superfície), também conhecido como SMD (*Surface Mount Device* – Dispositivo de montagem à superfície). Nesta tecnologia, os componentes eletrónicos são montados sob a superfície de uma PCI. Já na tecnologia PTH (*Pin Through Hole* – Através de pino e furo), já salientada na descrição de montagem manual de Stick Lead, os pinos ou terminais dos componentes eletrónicos são inseridos manualmente e soldados através de furos na placa de circuito impresso. Neste tipo de tecnologia (PTH) são utilizados meios humanos para realizar a montagem. Por sua vez, a solda dos componentes é realizada através de uma máquina de onda, na qual a solda líquida percorre a superfície inferior do circuito impresso.

Na tecnologia SMT, são usadas máquinas automáticas para inserção dos componentes durante todo o processo de produção, desde a aplicação da pasta de solda até mesmo a montagem dos

componentes e a fusão da pasta de solda, pois os componentes em geral são muito pequenos, sensíveis e carecem de grande precisão de montagem, exigindo assim um controlo muito rígido dos parâmetros do processo.

SMT e SMD podem ser facilmente confundidos por serem designados por siglas muito semelhantes mas, na verdade, são dois elementos distintos no processo de montagem de circuitos impressos.

Surface Mount Technology (SMT) designa o método através do qual são montados componentes diretamente na superfície da placa de circuitos impressos, permitindo o aproveitamento de ambas as faces. Componentes eletrónicos criados desta forma são denominados dispositivos de montagem superficial ou SMD (*Surface-Mount Devices*). Na indústria, tem substituído amplamente o método de montagem *through-hole* nos quais os componentes são posicionados através de terminais conduzidos através de buracos da placa de circuito, permitindo o aproveitamento de somente uma face da mesma.

3.3.1 - Breve descrição do processo de produção SMT

- Gravação Automática da placa – Identificação do produto com a gravação de um código de barras único que vai rastrear cada placa individualmente em todo o processo, servindo para a recolha de dados relativos ao produto e permitindo criar um histórico e uma forma de rastreabilidade.
- Colocação Rampa *Just in Time* (JIT) - Alocação do produto na linha JIT após gravação do código de barras, de forma a garantir que os pedidos de produção respeitam o critério FIFO (*First In First Out*).
- Impressão de pasta de solda – A pasta solda é uma mistura homogénea e consistente de metais, cuja função é fazer a ligação entre os terminais do componente e os circuitos impressos da placa.
- Inspeção – Verificação da deposição da pasta de solda através de um equipamento especializado. Testa a altura, o descentramento, a coplanariedade.
- Aplicação de Componentes – Montagem, executada por equipamentos *Pick&Place*, na placa, e nos eixos X e Y, de componentes recolhidos nos alimentadores e

colocando-os na posição de inserção pré-definida pelo *software* do equipamento.

- Estufa de Soldadura – Equipamento onde se processa a soldadura, *Reflow*, dos componentes ao PCI. Este processo requer um aumento de temperatura gradual até ao ponto de fusão e posterior arrefecimento.
- Inspeção Automática do Produto – Local onde se verifica a conformidade dos *PCI's*, utilizando equipamento de inspeção ótica (AOI), constituídos por câmaras digitais em posição ortogonal e angular.
- Posto de Retrabalho (*Rework*) – No caso de não-conformidades no posto de verificação, os *PCI's* são analisados e classificados por colaboradores devidamente formados e certificados (pelas Normas Internacionais de soldadura IPC7711) que decidem se existe possibilidade de retrabalho ou se se trata de uma peça de refugo.

Na eventualidade de retrabalho, a peça será sujeita novamente a inspeção ótica automática (*AOI*) de forma a se voltar a testar a sua conformidade (R. S. o. IPC, October 2003).

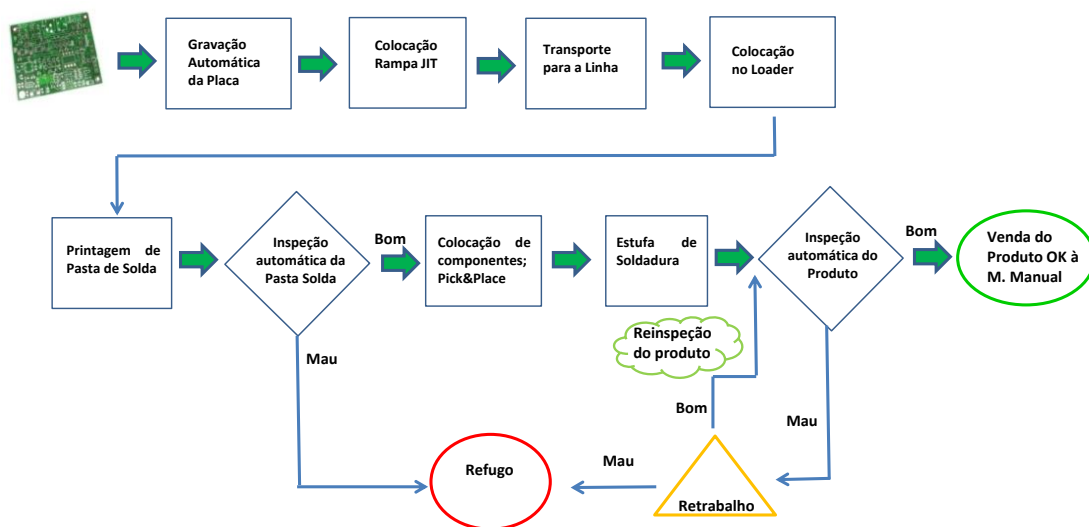


Figura 16: Fluxograma do Processo de SMT

Como a Delphi Automotive Systems Portugal procura sempre utilizar a mais elevada tecnologia existente, está equipada com dez linhas de montagem SMT totalmente automatizadas para, de forma rápida e eficiente, satisfazer os pedidos dos seus clientes alinhados com os requisitos de produto esperados pelo cliente.

3.4 - Linha de Montagem Automática

Uma linha de montagem SMD é constituída essencialmente por três fases representadas na Figura 17:

- Deposição de pasta de solda e a sua posterior inspeção a 100% por uma máquina de inspeção automática segundo os critérios de aceitação de deposição de pasta de solda (IPC7257);
- O processo de inserção de componentes *SMD* por máquinas automatizadas;
- A soldadura da *PCI* por processo *reflow* e a sua inspeção ótica segundo a norma IPC A-610.

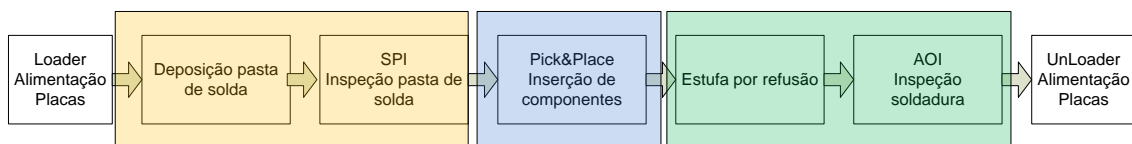


Figura 17: Fluxo do processo de SMT

3.4.1 - Impressão de pasta de solda

Durante a primeira fase é colocada a pasta de solda ou adesivo no circuito onde vão ser colocados os componentes SMD. A aplicação da pasta de solda é considerada um processo crítico com considerações especiais de carácter ambiental. Estas considerações serão posteriormente abordadas nesta dissertação.

A pasta de solda é uma mistura de partículas de solda suspensas em fluxo líquido, sendo utilizada em processos de soldadura automática. As partículas de solda são uma mistura de alumínio e chumbo, mas a legislação introduzida pela norma *RoHS* obriga a que os estados membros da União Europeia adotem a utilização de solda com percentagens de chumbo muito limitadas.

A deposição da pasta de solda é feita, normalmente, por um processo de impressão serigráfica representada na Figura 18, cuja aplicação é feita pela pressão e rolagem da pasta de solda sobre a tela para que a pasta penetre nas aberturas, tome a sua forma e após a separação da tela e placa se fixe na placa de circuito impresso.

Os passos durante a impressão serigráfica da pasta de solda são:

- Sistema de *profflow* impele a tela para baixo aguardando uma distância de 0 (zero) entre a tela e a placa e força entrada de pasta de solda nas aberturas da tela;
- Pasta de solda preenche as aberturas da tela e adere nos *Pads* da placa;
- Separação da tela da placa deixa a pasta de solda sobre os *pads* da placa na forma de blocos.

As pastas de solda historicamente usadas são à base de chumbo, embora a cada vez mais usada seja a pasta “*lead-free*” (sem chumbo) a qual advém da obrigação legal de limitar o uso de materiais nocivos em equipamento elétrico e eletrônico imposto pela diretiva RoHS de 1 de Julho de 2006. Entre esses componentes encontram-se o chumbo, mercúrio, cádmio e cromo hexavalente, substâncias comuns no processo de soldadura.

Depois de vários anos de investigação, verificou-se que a opção de melhor qualidade é uma solda que tem o princípio ativo SnAg3.8Cu0.7 (SAC) que é lead-free e que proporciona uma soldadura de elevada qualidade sem pôr em risco os técnicos que entram em contacto direto com esta composição, porém, este tipo de solda necessita de três segundos de contacto a uma temperatura de 260° para ficar com um bom nível de qualidade.

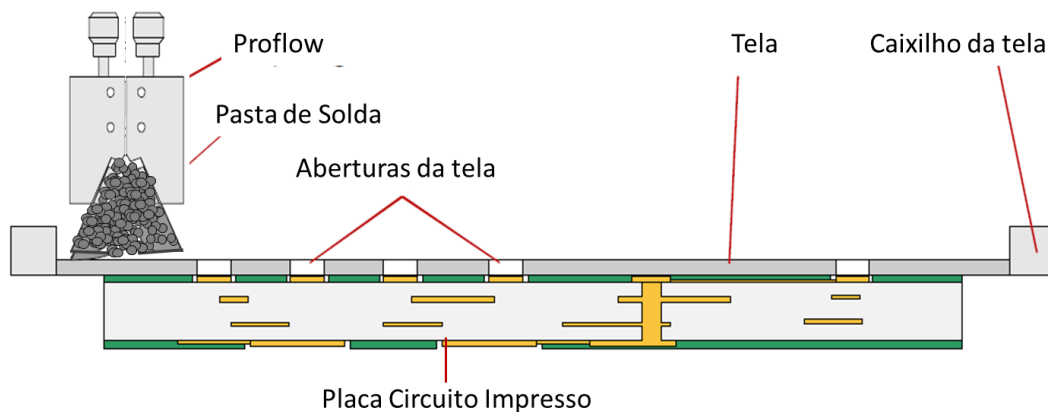


Figura 18: Processo de deposição de pasta de solda

A qualidade final da deposição de pasta de solda na placa está dependente de várias variáveis do processo de impressão: as telas; a pasta de solda; o sistema de impressão; o sistema de limpeza; parâmetros de impressão; suporte das placas; inspeção da pasta de solda.

O primeiro elemento de importância para a impressão de pasta de solda são as telas.

Estas são únicas para as diferentes placas, comprometendo-se com as características intrínsecas de cada produto como a definição da localização dos *pads* de impressão.

A função da tela é possibilitar que seja possível depositar no PCI a quantidade certa de pasta de solda na localização definida. Tendo em consideração a espessura da tela e as dimensões da abertura, pode calcular-se a área, o volume e a altura da pasta de solda esperados ou teóricos através do cálculo do “*Release ratio*”, cujo resultado ótimo espera um valor acima dos 0,6. Este cálculo é dado pela seguinte expressão:

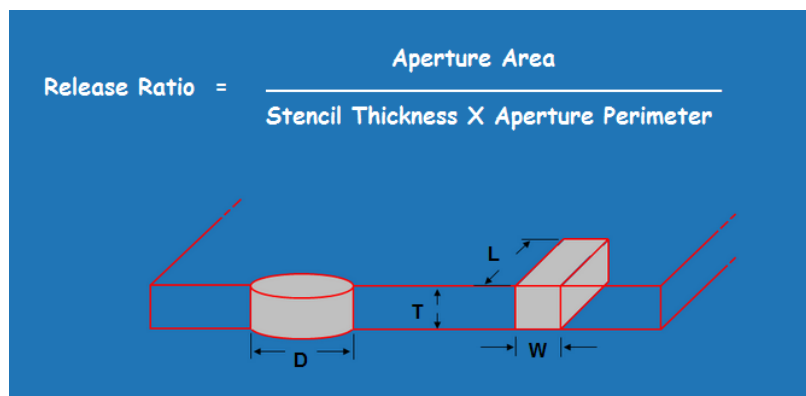


Figura 19: Fórmula de cálculo do *release ratio* (Cookson)

Existem basicamente três formas de fabricar uma tela.

Por um lado é utilizando o corte a laser em material de inox, a mais comum, pois é a que tem a melhor relação qualidade/preço.

Por outro lado, sendo a técnica uma abordagem alternativa é utilizando a tecnologia “*electroformed*”, a qual define um corte com o ângulo mais próximo dos 90°, o que significa que a abertura em cima é praticamente igual em baixo. As paredes da abertura da tela ficam bastante lisas, facilitando a transferência de pasta de solda para a placa. Contudo, o custo é a sua principal desvantagem.

A terceira opção é a gravação química, também numa chapa de inox. É pouco utilizada neste tipo de processo de soldadura pois apresenta algumas limitações quando se pretendem aberturas de menor dimensão. A sua maior vantagem é o baixo custo.

A tela é um dos fatores axiais na qualidade de uma soldadura e, é ela quem define a quantidade de pasta de solda depositada, embora existam outros fatores também com importante contribuição neste processo, nomeadamente a ferramenta de suporte do PCI dentro da máquina de deposição de pasta e os parâmetros definidos na mesma.

A pasta de solda é outro dos fatores fundamentais para a impressão da pasta de solda.

A empresa em questão usa pasta de solda PB (com chumbo) tipo 3 e pasta de solda Lead Free (sem chumbo) tipo 4 representadas na Figura 20.

No passado a pasta de solda mais utilizada era a pasta com chumbo, contudo, atualmente o peso da pasta de solda PB na fábrica é de apenas 17% e a LF é de 83%. Na pasta Tipo 3 PB as partículas compreendem um diâmetro médio entre 25 e 45 micrómetros. Com a diretiva RoHS passou ser mais comumente utilizada a pasta Lead Free tipo 4 em que as partículas compreendem um diâmetro médio entre 20 e 38 micrómetros, promovendo assim uma deposição de pasta de solda mais homogênea na placa (Renaud, 2012).

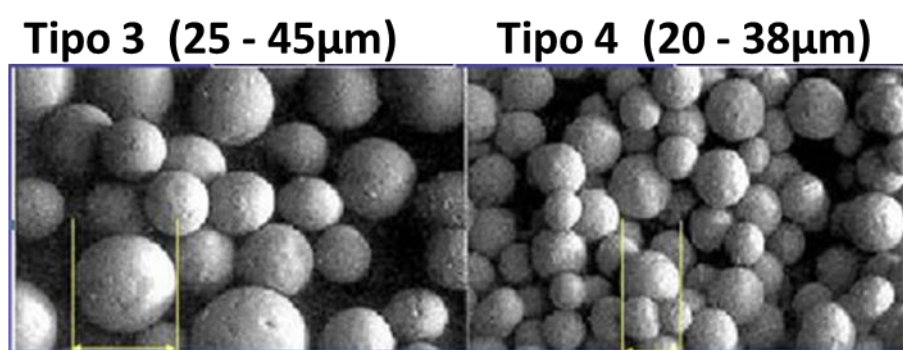


Figura 20: Cookson Eletronic: Imagem ampliada dos tipos de pasta de solda 3 e 4

O sistema mais comum de apoio à impressão de pasta de solda são os *squeegees*,

Este processo assenta no transporte da pasta de solda o longo da placa por lâminas no sentido vertical com ângulos definidos. No entanto, a empresa Delphi Automotive Systems Portugal utiliza um sistema de *proflow* cujo conceito consiste num cartucho em que a pasta está acomodada no seu interior sem assim sofrer influências ou contaminações do ambiente exterior.

As máquinas de impressão de pasta de solda estão equipadas com um sistema de limpeza programável, em que se pode definir ciclos de limpeza quantitativos, assim como parametrização qualitativa para diferentes tipos de placas.

Para garantir uma coplanaridade adequada à impressão de pasta de solda são usadas bases dedicadas ou sistemas de *GridLok* para garantir a correta sustentação das *PCIs*.

As bases dedicadas são usadas em placas cuja necessidade de suporte é mais crítica. O suporte é mais homogêneo, sendo essa a sua maior vantagem.

O suporte por “*Grid-Lok*” é uma solução mais flexível, pois este não necessita de ser retirado da máquina de produto para produto. A sua vantagem é a moldagem dos pinos à placa com duplo *reflow*.

A etapa de aplicação de pasta de solda na placa é considerada a mais crítica na linha de montagem para o controle da qualidade de uma PCI. Como referido por DA, (1998), estima-se que cerca de 60% dos defeitos tem como origem esta etapa do processo. Este autor promove que apenas 41% dos defeitos na aplicação da pasta podem ser detetados por uma inspeção em 2D e 100% por uma inspeção em 3D tendo como base de parametrização as normas internacionais IPC 7527 (*Criteria for Solder paste deposition*).

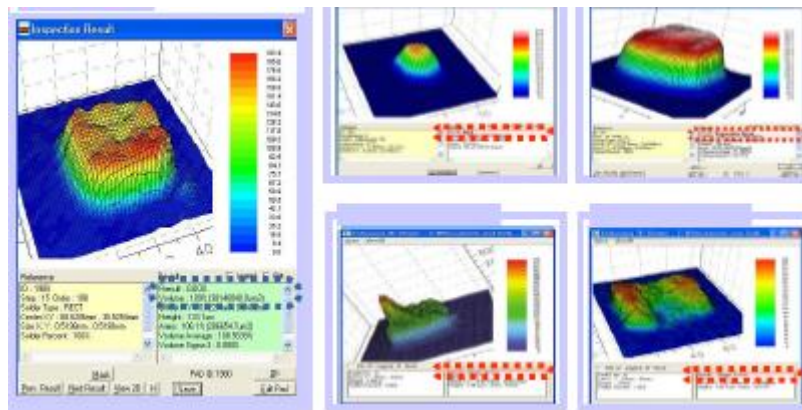
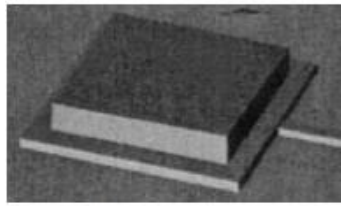


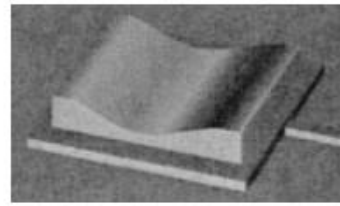
Figura 21: Medições em 3D (máquina KohYoung)

Os sistemas de camaras KohYoung são capazes de uma cobertura a 100% em 3D representadas na Figura 21 de forma a detetarem uma variedade de defeitos, entre eles, a falta de solda, excesso de solda, curtos de solda, assim como deformações na área ou volume da quantidade de pasta esperada.

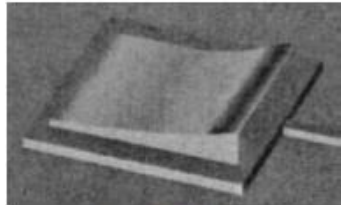
A otimização da máquina, assim como as orientações de validação dos utilizadores seguem as diretrizes da IPC 7527 (Standard, 2012), “Requisitos para a impressão de pasta de solda”. Esta norma tem como objetivo a normalização dos parâmetros de inspeção e é de enorme apoio para os operadores do processo SMT. Os critérios mais críticos da deposição de pastas de solda são apresentados nas Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27.



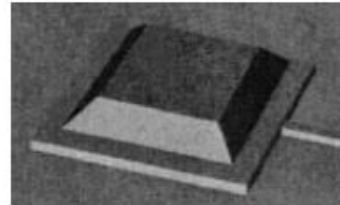
Forma Completa



Forma de sela

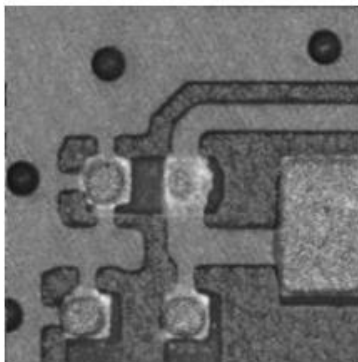


Forma de telhado

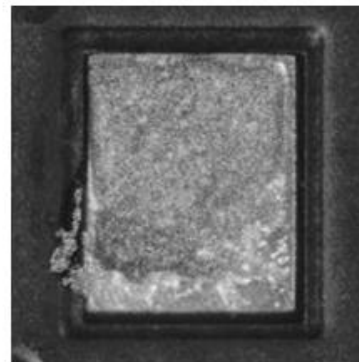


Forma em Pirâmide

Figura 22: Formas de deposição de pasta de solda

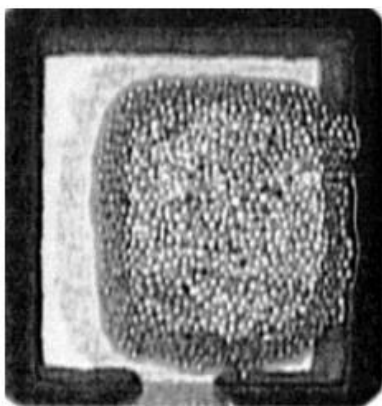


Defeito: Cobertura <50% da abertura da tela.

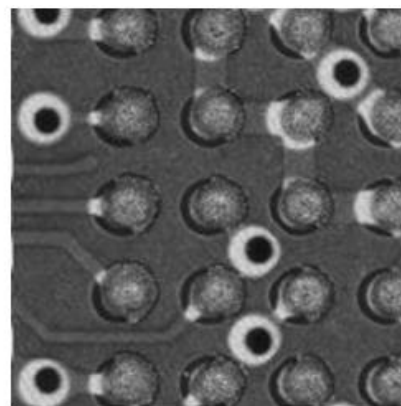


Aceitável: Cobertura >50% da abertura da tela

Figura 23: Critérios de área impressa

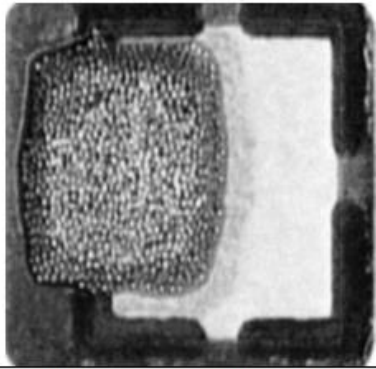


Aceitável: Descentramento \leq a 25% do pad

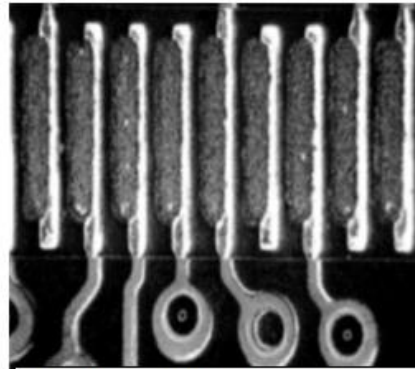


Aceitável: Descentramento \leq a 25% do pad

Figura 24: Critérios de Offset da posição de pasta (aceitáveis)

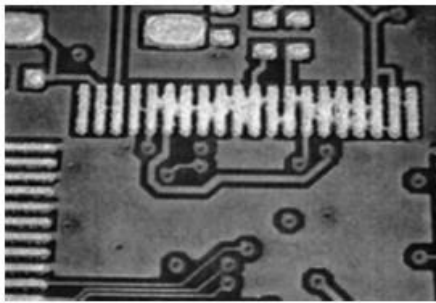


Defeito: Descentramento \geq a 25% do pad

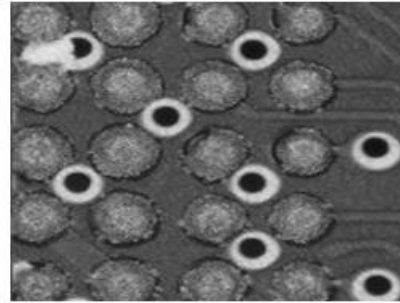


Defeito: Descentramento \geq a 25% do pad

Figura 25: Critérios de deposição de pasta de solda (defeito)

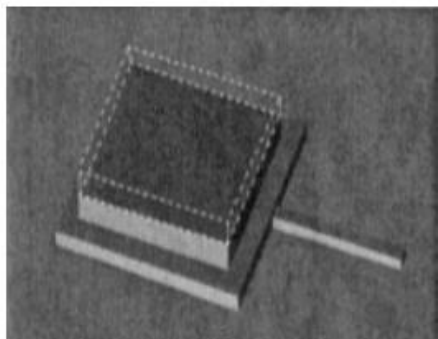


Defeito: Ligação de um ponto de solda com o adjacente

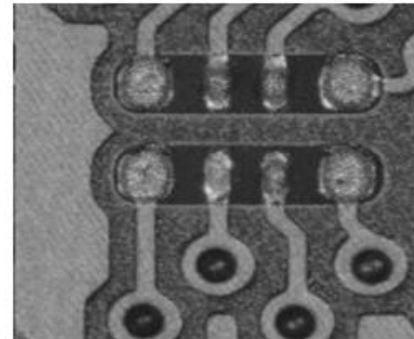


Defeito: \geq a 25% do tamanho do pad

Figura 26: Critério de deposição de pasta de solda (Curto)



Defeito: Altura da pasta \leq 50% da espessura da tela



Defeito: Altura da pasta \geq 50% da espessura da tela

Figura 27: Critérios de altura da pasta de solda

A máquina de inspeção de pasta de solda KohYoung referida anteriormente está dotada de uma capacidade estatística de feedback da qualidade de elevado valor para o utilizador, assim como para os responsáveis pela Engenharia da Qualidade (Figura 28).

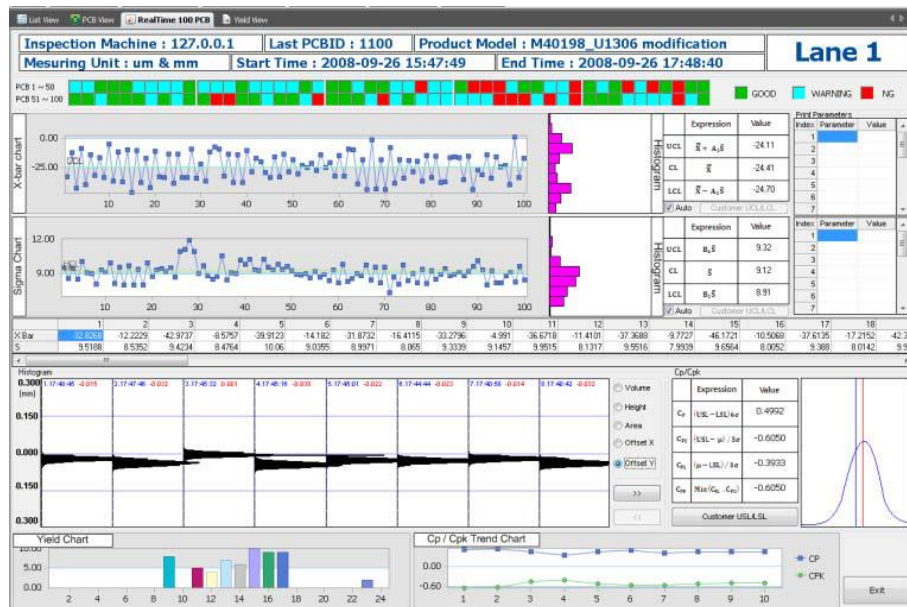


Figura 28:Output SPC em tempo real (PCI, Histogramas, gráficos de controlo Cpk)

3.4.2 – Processo de Montagem de componentes (Pick&Place)

Na fase seguinte, conhecida como “*pick&place*” (P&P), os componentes são colocados nas suas posições previamente definidas por um programa dedicado para cada conjunto antes de seguir para a última fase da linha de montagem.

Os componentes estão previamente acondicionados num alimentador ou comumente designado de “*feeder*”. Estes possuem diversas larguras consoante os materiais com que são utilizados.

As máquinas estão dotadas de sistemas de visão digitais ou analógicos padrão da indústria eletrónica como garantia da máxima qualidade de colocação e produtividade. A colocação é definida pela leitura de “*fiducials*” que basicamente são pontos de referência na placa e todos os componentes são alvo de leitura assegurando a máxima resolução e iluminação adequada e foco perfeito.

As máquinas possuem sistemas de “*Gantry*” ou Cartesiano que consiste num sistema que possui uma cabeça de colocação montada num sistema X-Y que recolhe o componente SMD do alimentador que está numa posição fixa e o movimenta até a posição do componente no PCI que também se encontra fixo (Figura 29). Estas estão divididas em duas categorias, máquinas com cabeças revolver com 12 pipetas para colocação de elevado output de componentes em que a câmara de leitura da peça está instalada junto ao revólver e máquinas habilitadas com cabeças de precisão para componentes de criticidade acrescida em que após segurar a peça, esta é levada a uma câmara dedicada em que é feita a leitura dedicada e centragem da peça (Figura 30).



Figura 29: Processo de Coleta de componentes (ASM)



Figura 30: Processo de inspeção de componentes (ASM)

As máquinas de “P&P” movimentam os componentes SMD dos alimentadores até o local de posicionamento com pipetes que funcionam a sistema de vácuo.

Diversos modelos de pipetes como as apresentadas na Figura 31 são projetados pelos fornecedores de máquinas “P&P” para conseguir recolher os mais diversos tipos de formatos de componentes SMD e para que os sistemas de visão consigam identificar os componentes SMD a serem posicionados e colocados com a precisão Qualitativa esperada.



Figura 31: Pipetes de coleta de material (ASM)

3.4.2.1 – Componentes

A Montagem Automática dos componentes na área eletrônica tem vindo a aumentar devido a inúmeras vantagens face aos restantes processos produtivos, nomeadamente:

- Diminuição de ruídos, menores tempos de espera;
- Menor interferência eletromagnética;
- Redução de área do Circuito Impresso em 50% comparado com um PCI típico;
- Redução do número de camadas de cobre em 40%;
- Melhoria nas características mecânicas;
- Maior velocidade de colocação dos SMD;
- Aumento de “Yield” e eficiência.

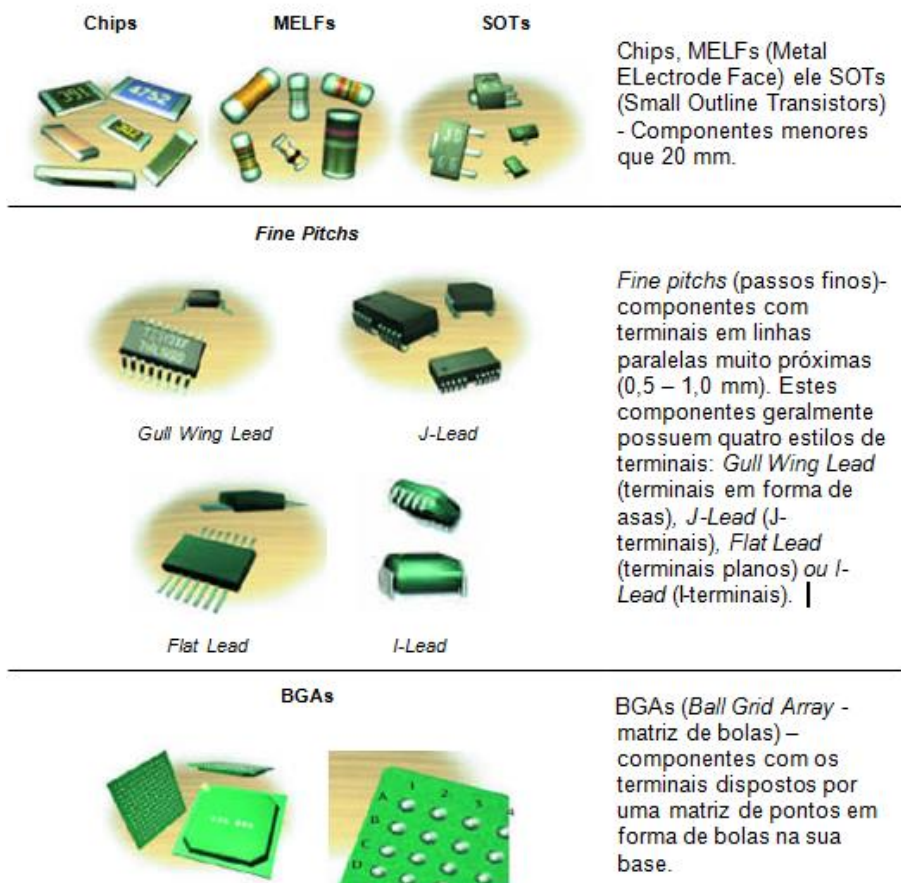


Figura 32:IPC A-610: Componentes SMT

Cada um dos tipos de *SMDs* referidos implica a deposição de tantos pontos de solda quantos terminais o componente tiver.

Os mais usados são os “componentes passivos”, que normalmente são resistências, condensadores, bobines, que podem encontrar-se em diferentes tamanhos *standards*, conforme a Tabela 1. Os mais utilizados na Delphi Braga são os componentes 0402, contudo, é a única fábrica da Delphi com a colocação de componentes de tamanho 0201.

Tabela 1: Designação *standard* consoante dimensão do SMD

Designação Standard	Dimensão (mm)
1005	0,4 x 0,2
0201	0,6 x 0,3
0402	1 x 0,5
0603	1,6 x 0,8
0805	2,0 x 1,25
1206	3,2 x 1,6
1812	4,6 x 3,0
2512	6,3 x 3,0

3.4.2.2 - Soldadura

Durante a fase final do processo de montagem, os circuitos passam em estufas de *reflow* que produzem calor suficiente para que a solda atinja o estado líquido e una os substratos de forma uniforme. Após um breve período de arrefecimento, os circuitos estão prontos para seguirem o processo de produção do produto.

Este processo é crucial para o resultado final do presente estudo, pelo facto de uma das variáveis que mais foi ajustada para o processo de *Lead Free* foi o perfil de soldadura da estufa, ajustando à pasta de solda utilizada visto as duas terem uma temperatura de passagem para estado líquido diferente. A solda PB atinge a temperatura de *reflow* aos 183° e a LF usada pela DASP aos 217° podendo-se observar diferentes temperaturas de *reflow* para diferentes composições de pasta de solda no mercado como exposto na Tabela 2.

Tabela 2: Pontos de *reflow* entre pastas com chumbo (SnPb) e Lead Free

Temperatura (°C)	Liga
227	SnCu
221	SnAg
217	SnAgCu
205-215	SnAgBi
199	SnZn
183	SnPb
138	SnBi

Fonte: <http://smd-on-line.com/leadfree.htm>

De acordo com Doro (2004), as pastas de solda devem possuir as características descritas abaixo para obtenção de soldaduras de qualidade.

A *reflow* da pasta de solda acontece através do perfil de temperatura da estufa, ou seja, a curva da temperatura da placa em função do tempo. Este perfil é formado por fases distintas:

- Pré-aquecimento – nesta fase a temperatura é elevada da ambiente à de evaporação dos solventes da pasta de solda;
- Desgaseificação – nesta fase a temperatura é elevada lentamente com o propósito de ativar o fluxo e igualar a temperatura na placa;
- *Reflow* – nesta fase a temperatura é elevada para que as esferas de solda se fundam, formando então a junta de solda;
- Arrefecimento – a temperatura é reduzida gradativamente até a temperatura ambiente.

As estufas de *reflow* forçada são uma evolução das estufas de infravermelho e são o padrão industrial para a soldadura no processo SMT. Este sistema funciona através de ar ou um gás quente que é circulado por ventiladores potentes em zonas térmicas separadas e guiados por um sistema de bicos sobre a placa como destacado por Fonseca, (2013) no seu trabalho intitulado Desafios Técnicos e Empresariais Diretrizes WEEE & RoHS.

Selecionando a temperatura nas diversas zonas a velocidade de aquecimento pode ser ajustada, de acordo com os requisitos da pasta de solda e da placa de PCI.

3.4.3 - Inspeção automática de soldadura: AOI

Como ultimo controlo temos a AOI (*Automatic Optical Inspection*) cujo teste é feito após o processo de soldadura, isto é, já com os componentes soldados. Este teste tem por base as normas IPC A-610 e tem como finalidade a deteção de uma panóplia de possíveis defeitos, tais como *tombstones*, material descentrado, curtos de solda, soldas frias, material rodado, entre outros.

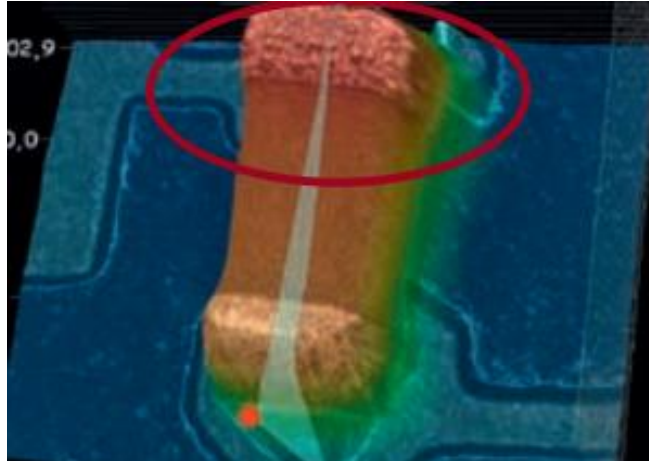


Figura 33: Exemplo de imagem de Inspeção da AOI - Manual Viscom

É neste passo que se mede, de forma estatística, a qualidade da linha, ou seja, é nesta máquina que se contabilizam quantas placas com defeito foram detetadas através de uma monitorização “*p-chart*” cuja equação será desenvolvida no ponto 3.5.

A máquina inspeciona imagens digitalizadas em tempo real, havendo uma rejeição e segregação da placa para posterior avaliação do operador. O operador tem duas opções:

- Confirmação do defeito que a máquina detetou, assinalando o defeito no sistema interno de inspeção e remetendo a placa para a área de retrabalho. Após o retrabalho da mesma, a placa deverá retornar à máquina de inspeção para validação do retrabalho conforme as normas;
- Discordar da decisão da máquina, o que significa que a placa não tem defeito. Esta classificação é considerada falsa rejeição e os dados são utilizados pela equipa da Engenharia de Visão para otimização dos parâmetros de inspeção.

3.5 - FTQ: Real DPM

Como referido anteriormente, a eficiência qualitativa é medida por um processo dinâmico de monitorização no último ponto de verificação da qualidade da área SMT tendo como base o número de componentes inseridos pelas máquinas de inserção automática e os defeitos detetados em SMT pelas AOI, inspeção visual e Raio-X, assim como, pelos defeitos identificados nos testes elétricos (ICT) da Montagem Manual (Equação 1).

EQUAÇÃO 1: CÁLCULO DPM

$$FTQ \text{ ppm Component Level} = \frac{\text{number of components rejected: } AOI_{\text{real}} + ICT_{\text{real}} + Xray_{\text{real}} + \text{visual inspection}_{\text{real}}}{\text{number of SMT components placed}} \times 1,000,000$$

3.6 – Gestão da Qualidade

Torna-se importante referir o papel da Gestão da Qualidade e das suas principais ferramentas no processo de melhoria no seio da Delphi. Considerando o desenvolvimento das tecnologias permitindo que toda a informação circule globalmente em tempo real, poderá dizer-se que todo o setor industrial tem um grande interesse na implementação destas metodologias que tem como abordagem não só na área da qualidade, mas surge também como uma opção válida para a melhoria da eficiência e eficácia em termos financeiros (Pyzdek, 2003).

A abordagem contemporânea sustentada por dados e factos traz benefícios comprovados no aumento da eficiência dos processos de produção, redução dos custos associados com a inspeção, retrabalho, insatisfação dos clientes e desperdício, suportando assim as metodologias de foco em processos, melhoria contínua, foco no cliente, mudança de cultura industrial, e comprometimento com a excelência (Dey, 2013).

John, Edward, & Venkat (2012) salienta que as primeiras preocupações com aspetos relacionados com aquilo a que hoje se poderá identificar como qualidade remontam a períodos tão longínquos como, por exemplo, a época da construção das pirâmides do Egito, onde já eram aplicados esquemas de planeamento. Porém, é já no século XX que a qualidade começa a maturar como disciplina de Inspeção por excelência. Esta evolução surge associada à emergente criação de estratégias de produção industrial em massa, ideias preconizadas por Ford. A ideia de melhoria contínua, envolvendo a melhoria de processos, produtos, serviços e cultura, passou nesta fase a contemplar transversalmente a organização – Gestão da Qualidade e *Total Quality Management* (TQM). No seu cerne, o TQM poderá classificar-se como uma abordagem de Gestão com vista a um êxito a longo-prazo baseado na satisfação dos clientes. Os seus métodos derivam dos ensinamentos de especialistas em qualidade como Philip Crosby, Edwards Deming, Armand Feigenbaum, Kaoru Ishikawa e Joseph Juran como se pode constatar

na Tabela 3: Autores e contribuições para o TQM.

Tabela 3: Autores e contribuições para o TQM

Autor	Contribuição
Walter Shewhart	<ul style="list-style-type: none">• Contribuiu para a compreensão da variabilidade dos processos• Desenvolveu o conceito de gráficos de controlo estatístico
W. Edwards	<ul style="list-style-type: none">• Enfatizou a responsabilidade da Gestão pela qualidade
Deming	<ul style="list-style-type: none">• Desenvolveu os 14 pontos para orientar as organizações na melhoria da qualidade
Joseph M. Juran	<ul style="list-style-type: none">• Definiu Qualidade como fitness for use• Desenvolveu o conceito de cost of Quality
Armand V. Feigenbaum	<ul style="list-style-type: none">• Introduziu o conceito de Total Quality Control
Philip B. Crosby	<ul style="list-style-type: none">• Criou a expressão A qualidade é gratuita• Introduziu o conceito de zero defeitos
Kaoru Ishikawa	<ul style="list-style-type: none">• Desenvolveu o diagrama causa-efeito• Identificou o conceito de cliente interno
Genichi Taguchi	<ul style="list-style-type: none">• Concentrou-se na qualidade do design de produto• Desenvolveu a função de perda

Com o intuito de auxiliar as organizações a aumentarem a qualidade e produtividade, Deming criou um conjunto de práticas resumidas batizadas de 14 pontos de Deming consultados na página (<http://asq.org/learn-about-quality/total-quality-management/overview/deming-points.html>) a 30-01-2015. Destes pontos podem destacar-se:

- Criar um propósito constante para a melhoria dos produtos ou serviços;
- Acabar com a dependência da inspeção na procura da qualidade;
- Melhorar constantemente e *ad eternum* todos os processos de planeamento, produção e serviços;
- Instituir formação no trabalho;
- Instituir um forte programa de formação e auto melhoria;
- Reunir todos na concretização da transformação da organização.

Como referido por Jiju, (2012), com os contributos dos autores referidos, deram-se grandes

mudanças no conceito de qualidade, chegando-se hoje a um ponto em que a Gestão da Qualidade tem um papel bem definido e relevante.

Como forma de complementação e suporte aos projetos de melhoria Seis Sigma recorre-se a um conjunto de sete ferramentas estatísticas.

3.6.1 - Fluxogramas

O fluxograma consiste numa esquematização que apresenta todas as fases de um processo ou procedimento. Um fluxograma deve ter por objetivo identificar o fluxo do processo, bem como a interação entre as fases do processo. Uma das grandes vantagens das empresas recorrem a fluxogramas para representar o seu processo reside no facto de este poder ajudar na identificação de potenciais pontos de controlo e melhoria do processo (Montgomery, 2008).

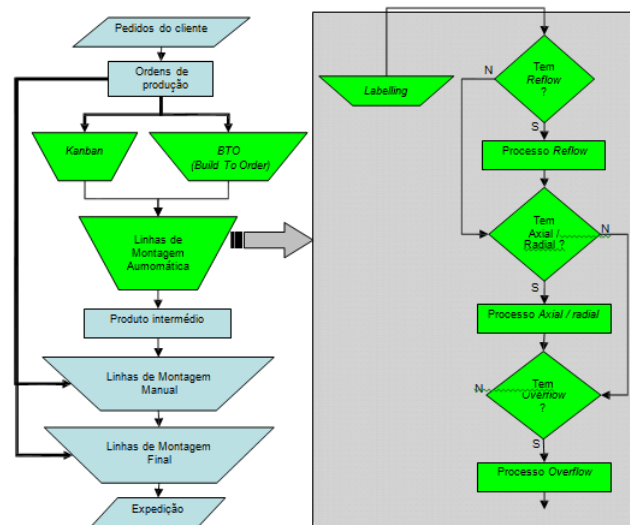


Ilustração 1: Fluxograma simplificado do processo produtivo Delphi

3.6.2 - Diagrama de causa-efeito

Sempre que uma empresa identifica um defeito, um erro, ou um problema deve realizar um estudo para analisar quais são as potências causas desse mesmo defeito, e quais os efeitos que advém desse mesmo defeito. Nas situações em que as causas não são claras, a utilização de um diagrama de causa-efeito é uma ferramenta que pode facilitar na compreensão da

interligação das causas potências de um determinado efeito. Esta ferramenta deve ser construída por uma equipa de melhoria da qualidade com o objetivo de identificar principais áreas problemáticas no processo da empresa.

Os passos para construir um diagrama de causa-efeito são:

- Definir o problema ou o efeito que vai ser analisado;
- Formar uma equipa para analisar o problema ou efeito (equipa da melhoria da qualidade), essa equipa deve ser multidisciplinar e deve analisar esse problema ou efeito recorrendo a um brainstorming;
- Construir a linha central do diagrama;
- Especificar os principais problemas por categorias de causa e conectar com a linha central;
- Identificar as principais causas e classificá-las em categorias. Pode-se caso necessário acrescentar mais categorias;
- Ordenar as causas identificadas segundo uma ordem das que parecem ter maior impacto no problema ou defeito;
- Tomar ações corretivas.

Na análise do problema ou defeito, deve-se classificar as causas segundo as máquinas, o material, o método, a medição e o pessoal como referido por Montgomery, (2009).

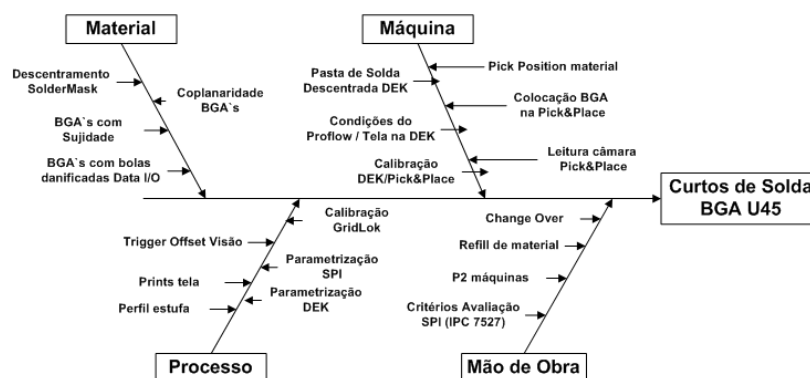


Ilustração 2:Diagrama de Causa-efeito (DPS Curtos de Solda Delphi)

3.6.3 - Análise de Pareto

Um diagrama de *pareto* consiste numa distribuição de frequências de atributos agrupados por categorias. Através desta ferramenta pode-se visualizar de uma forma rápida e simples qual ou quais os defeitos que ocorrem com mais frequência. O diagrama de *pareto* é uma das sete ferramentas da qualidade mais utilizada (Montgomery, 2009).

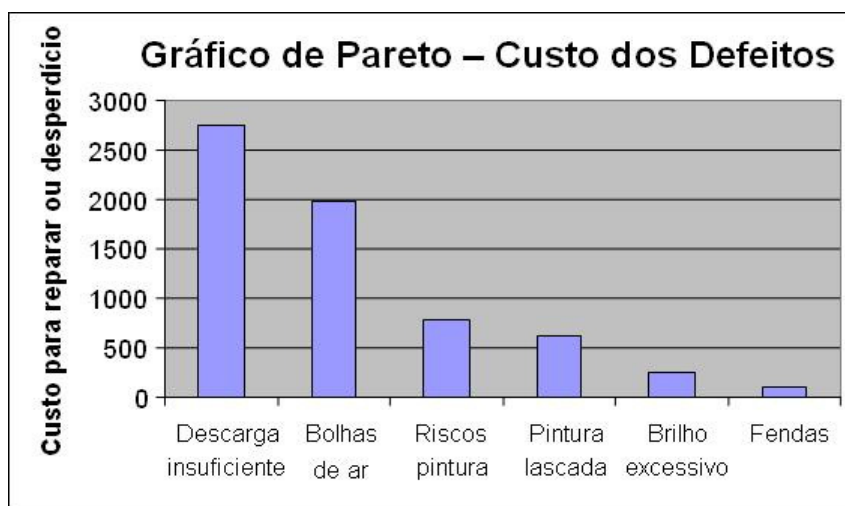


Figura 34: gráfico de Pareto- Manual de formação DPS da Delphi

3.6.4 - Histogramas

Um histograma é o gráfico idêntico a um gráfico de barras, muito utilizado na representação de distribuições de frequência. A distribuição de frequências representa a frequência com que cada valor diferente de um conjunto de dados ocorre. As barras, neste tipo de gráfico, apresentam os dados agrupados, com o intuito de evidenciar a relação existente entre características. Um histograma é normalmente utilizado quando os dados em estudo são numéricos, em que se pretende verificar a forma de distribuição de dados, especialmente quando se pretende determinar se as saídas de um processo apresentam alguma distribuição normal e em que se pretende determinar se um processo pode atender aos requisitos do cliente. Resumidamente quando se deseja comunicar a distribuição de dados de forma rápida e fácil como referido por Montgomery, (2009).

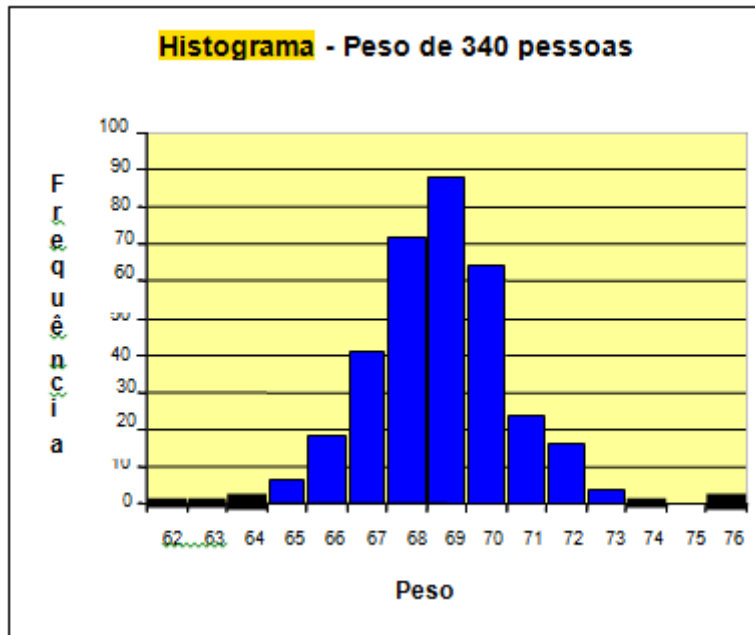


Figura 35:Histograma- Manual de formação DPS da Delphi

3.6.5 - Folhas de verificação ou check-list

Para a melhoria de um processo muitas vezes é necessário recolher dados históricos, operacionais e atuais acerca do processo que está a ser estudado. A folha de verificação é muito utilizada para auxiliar a melhoria de um processo, na medida em que permite recolher os dados necessários para o estudo e melhoria do processo. Sempre que se está a desenvolver uma folha de verificação é importante incluir informação como o tipo de dados que vão ser recolhidos para análise, a data, o analisador e a identificação do processo (Montgomery, 2009).

CHECK SHEET DEFECT DATA FOR 2002-2003 YTD																		
Part No.: TAX-41																		
Location: Bellevue																		
Study Date: 6/5/03																		
Analyst: TCB																		
Defect	2002												2003					Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
Parts damaged	1		3	1	2		1		10	3			2	2	7	2	34	
Machining problems			3	3					1	8	3		8	3			29	
Supplied parts rusted			1	1		2	9										13	
Masking insufficient			3	6	4	3	1										17	
Misaligned weld	2																2	
Processing out of order	2													2			4	
Wrong part issued		1						2									3	
Unfinished fairing			3														3	
Adhesive failure				1					1				2	1	1		6	
Powdery alodine					1												1	
Paint out of limits						1							1				2	
Paint damaged by etching			1														1	
Film on parts						3	1	1									5	
Primer cans damaged							1										1	
Voids in casting								1	1								2	
Delaminated composite								2									2	
Incorrect dimensions									13	7			13	1	1	1	36	
Improper test procedure										1							1	
Salt-spray failure													4		2		4	
TOTAL:	4	5	14	12	5	9	9	6	10	14	20	7	29	7	7	6	166	

Figura 36:Folha de verificação (Fonte: (Montgomery, 2009))

3.6.6 - Gráficos de dispersão

Um gráfico de dispersão é utilizado para identificar potenciais relações entre duas variáveis. Se houver dados que estejam correlacionados, então os pontos irão sobrepor-se sob a forma de uma linha ou curva. Deve-se optar por utilizar diagramas de dispersão quando se pretende emparelhar dados; quando uma variável dependente pode ter vários valores para cada valor de uma variável independente; quando se pretende identificar a existência de variáveis relacionadas como possíveis causas de problemas ou efeitos comuns (Montgomery, 2009).

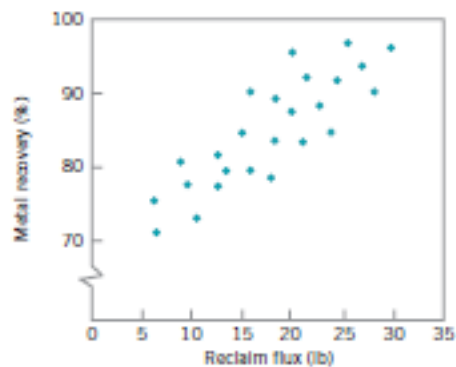


Figura 37: Gráfico de dispersão (Fonte: (Montgomery, 2009))

3.6.7 - Gráficos de controle

Os gráficos de controle são utilizados com o intuito de estudar como um processo varia ao longo do tempo. Um gráfico de controle apresenta uma linha ou limite central ou de controle para a média, uma linha superior para o limite superior de controle e uma linha inferior para o Limite de Inferior de Controle, estas linhas são determinadas a partir de dados históricos. Ao comparar os dados atuais com os limites de controle pode-se retirar conclusões sobre a variação do processo, isto é, se existe algum ponto fora dos limites de controle evidenciando que o processo não está controlado ou se pelo contrário o processo está controlado com todos os pontos dentro dos limites (Montgomery, 2009).

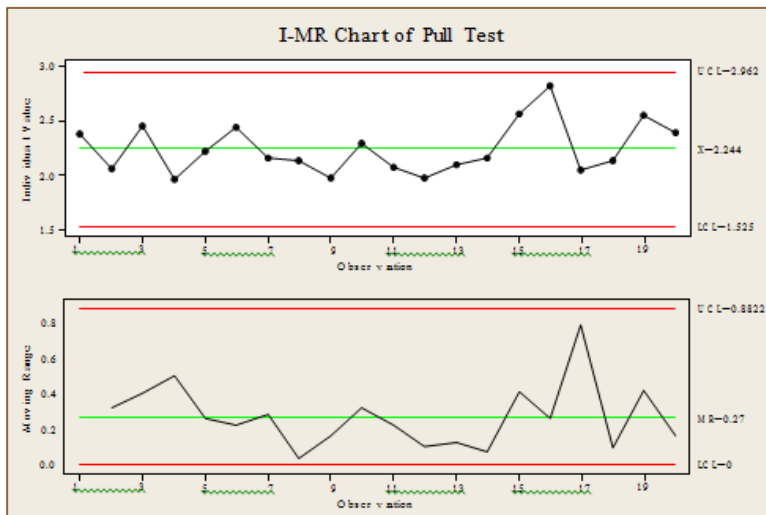


Figura 38: Gráfico de Controlo-Manual de formação DPS da Delphi

Ferramentas deste cariz, claramente orientadas para resultados e objetivos estratégicos, têm demonstrado resultados mensuráveis em planos como a qualidade, custo, e métricas de eficiência relevantes nos planos clínicos, operacional, e administrativo dos serviços de cuidados de saúde. Se estes aspetos são por si só vantajosos, dada a corrente conjuntura económico-financeira global, os mesmos rapidamente passam a estar na condição de necessidades prementes.

3.7 – DOE – Caso Prático

Nesta secção serão abordados os fatores e variáveis de resposta pertinentes ao objeto de estudo em causa.

3.7.1 – DOE – Caso Prático I

Nesta secção descrever-se-ão os fatores controláveis e de ruído axiais para o DOE, assim como, as variáveis de resposta e os seus requisitos qualitativos.

Numa primeira fase (*screening DOE*) vão ser considerados três fatores controláveis com dois níveis de otimização, quatro fatores de ruído e quatro variáveis de resposta.

Fatores controláveis:

- Pastas de solda – por motivos de uniformidade da Delphi Internacional foram selecionadas duas pastas de solda aprovadas para utilização nos processos de *reflow*. São estas a pasta OM340 da Alpha Metals e a LF318 da Henkel;
- Ambiente de *reflow* – A definição Delphi para concentração de oxigénio nas estufas centra-se nos 4.000ppm`s, logo, utilizou-se este valor como um dos níveis, o outro foi 210.000ppm`s que significa que não havia qualquer injeção de azoto nas estufas, sendo a soldadura feita em ambiente natural. Como observação é importante referir que a medição das estufas é feita quanto à concentração de oxigénio, logo, quanto menor o valor de *ppm`s* nas estufas maior é a concentração de azoto e menor a de oxigénio.
- O terceiro fator foi o perfil da estufa que, como já referido anteriormente nesta dissertação, o perfil de temperatura da estufa de refusão é um dos elementos principais para a qualidade do produto. Devido à convivência de materiais com diferentes dimensões nas placas, foram definidos dois perfis de temperatura para a execução das experiências com a diferença entre as curvas de temperatura podendo ser observadas na Figura 39. O perfil de refusão definido como “*Cool profile*” apresenta uma curva de temperatura mais acentuada, quer na rampa de aquecimento, quer na de arrefecimento, sendo um perfil no qual a placa está menos tempo sujeita a temperaturas de refusão. Já o perfil definido como “*Hot profile*” apresenta uma rampa de aquecimento mais suave, sujeitando a placa a mais calor e mais tempo na zona de refusão.

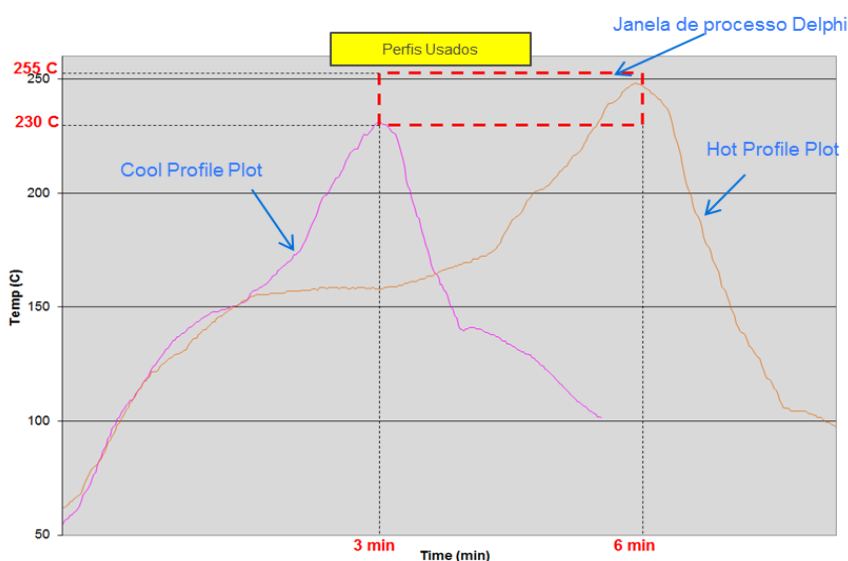


Figura 39: Perfis da estufa Reflow otimizados

Juntamente com os fatores controláveis foram introduzidos quatro fatores de ruído:

Material descentrado – Visa perceber a capacidade de alinhamento do componente nos pad`s durante a fusão da pasta. É esperado que os terminais do componente sejam atraídos pelo calor da solda durante o *reflow*;



Figura 40: Descentramento do Componente

- Pasta de solda descentrada – À semelhança do material descentrado, aqui será avaliada a recuperação da solda para o centro dos *pad`s* da PCB;

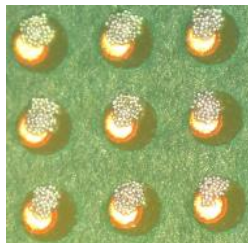


Figura 41: Descentramento da Pasta

- Utilização de pasta de solda com tempo de espera em ambiente natural superior a quatro horas – Esta ação visava avaliar a capacidade de soldadura das pastas após a perda de fluxos durante o tempo de espera;
- Utilização de placa com acabamento de OSP - O OSP (*Organic Solderability Preservative*) é uma cobertura orgânica que protege o cobre até à soldadura. Forma uma camada fina protegendo a superfície do cobre até que sofra um processo térmico em que a camada é removida como a soldadura *reflow*.

Vantagens do OSP:

- Possibilidade de retrabalho no fabricante;
- Barato;
- Boa integração com o material de proteção (solder mask).

Desvantagens do OSP:

- Difícil de Inspeccionar;
- Confiabilidade de soldadura após reflow;
- Ciclos térmicos limitados;
- Dificuldade de retrabalho;
- Vida limitada em stock;
- Necessita de testes elétricos antes de montagem.

Como características de resposta foram avaliadas as seguintes variáveis de resposta:

1. O FTQ fornecido pela inspeção automática da Linha seguindo os termos da IPC A610:

As especificações são baseadas nas necessidades dos clientes e da indústria, sendo que a Delphi tem como alvo o padrão de Classe 3 no referencial de soldadura representados pelas **Error! Reference source not found.2**, **Error! Reference source not found.3** e **Error! Reference source not found.4**, de forma a atender de forma consistente os requisitos e expectativas qualitativas dos clientes.

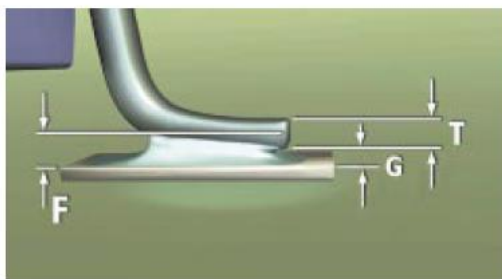


Figure 12-78

Acceptable - Class 2

- Minimum heel fillet height (F) is equal to solder thickness (G) plus 50% lead thickness (T) at connection side.

Figura 42: Fonte: Requisito Classe 2 IPC A610 para altura do menisco de soldadura

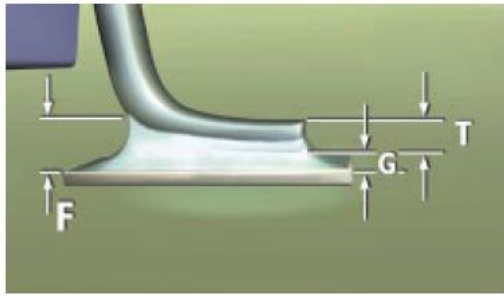


Figure 12-79

Acceptable - Class 3

- Minimum heel fillet height (F) is equal to solder thickness (G) plus lead thickness (T) at connection side.

Figura 43: Fonte: Requisito Classe 3 IPC A610 para altura do menisco de soldadura

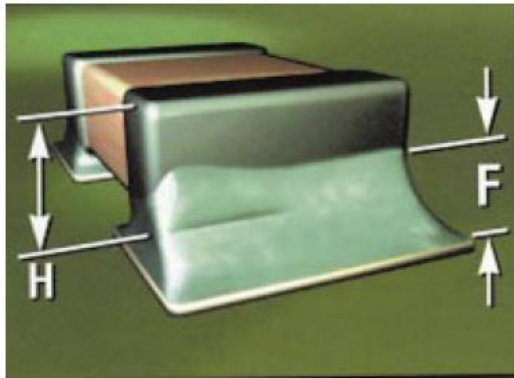


Figure 12-27

Acceptable - Class 1,2

- A properly wetted fillet is evident.

Acceptable - Class 3

- Minimum fillet height (F) is solder thickness (G) plus 25% termination height (H), or 0.5 mm [0.02 in], whichever is less.

Defect - Class 1,2

- A properly wetted fillet is not evident.

Defect - Class 3

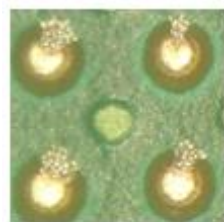
- Minimum fillet height (F) is less than solder thickness (G) plus 25% (H), or solder thickness (G) plus 0.5 mm [0.02 in], whichever is less.

Figura 44: Requisitos gerais IPC A610 para altura do menisco de soldadura

2. As movimentações de fluxo da solda que será analisada ao microscópio propõe avaliar a contaminação dos fluxos na soldadura;

3. A coalescência da solda:

É esperada através da fusão das partículas de solda uma unificação das esferas de pasta com uma metalização robustas como observável na imagem da direita Figura 45: Coalescência da Solda.



Exemplo de falha na coalescência; O Fluxo foi consumido durante a refusão. Situação inaceitável.



Exemplo de correta coalescência; O fluxo protegeu as esferas de solda. Situação aceitável.

Figura 45: Coalescência da Solda

4. A qualidade de soldadura do componente tipo *QFN*:

O *layout* crítico do QFN cria dificuldade na aplicação de solda e soldadura garantindo o cumprimento das especificações Delphi de cobertura de 25% do menisco (Figura 46:Soldadura de QFN).

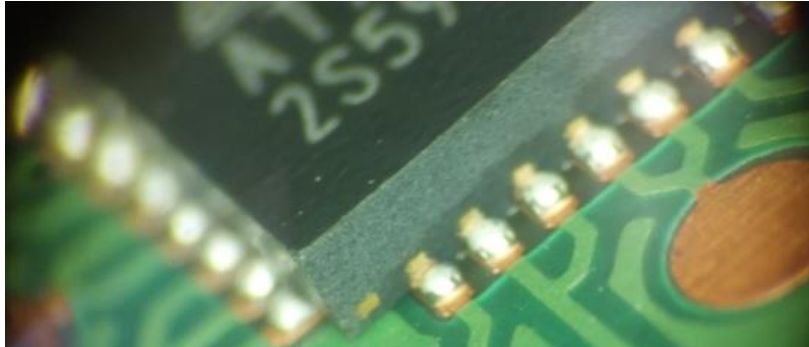


Figura 46:Soldadura de QFN

3.7.2 - DOE – Caso Prático II

Após a realização do *screening DOE*, e da análise aos resultados foi traçado um novo desenho de experiências (*Characterization DOE*). Para esta fase foram selecionados quatro fatores controláveis com diferentes níveis de otimização que serão descritos a seguir.

Fatores controláveis:

- Níveis de concentração de azoto (5 níveis) – De forma a compreender o impacto do azoto na soldadura reflow foram definidos diferentes valores de concentração de azoto nas estufas. Os valores propostos foram: 100ppm`s, 18.000ppm`s, 33.000ppm`s, 50.000ppm`s e 210.000ppm`s. De realçar que o ultimo valor apresentado significa a inexistência de azoto no interior da estufa;
- Acabamento da PCI (2 níveis) – OSP já explicado anteriormente e a *Immersion Tin* que importa referir possuir um acabamento metálico depositado por um processo de reação química que é aplicado diretamente sobre o cobre. O cobre e o estanho têm uma enorme aderência entre eles promovendo assim a durabilidade do tempo de vida das

placas. Atualmente é o acabamento mais utilizado nos produtos da DASP daí a sua inclusão nesta matriz;

Vantagens do Immersion Tin:

- Comparável a ENIG;
- Bom para componentes de pequena dimensão;
- Superfície plana;
- Elimina o níquel;
- Barato.

Desvantagens do Immersion Tin:

- Teste elétricos de painéis no fornecedor;
 - Contém *Thiourea*, um cancerígeno;
 - Ciclos limitados de retrabalho;
 - Potencial necessidade do uso de azoto para a soldadura por refusão.
-
- Primeiro ou segundo reflow (2 níveis) – Foram usadas placas com uma passagem prévia na estufa sem componentes de forma a simular dois *reflows* (choques térmicos) na placas e a sua influência nas variáveis de resposta;
 - Diâmetros das aberturas de tela (8 níveis) – Visa estudar a influência do volume de solda aplicada nos resultados qualitativos das variáveis de resposta.

Como características de resposta foram avaliadas as seguintes variáveis de resposta:

1. O FTQ fornecido pela inspeção automática da Linha seguindo os termos da IPC A610:

As especificações são baseadas nas necessidades dos clientes e da indústria, sendo que a Delphi tem como alvo o padrão de Classe 3 no referencial de soldadura apresentado anteriormente.

2. A coalescência da solda dos *BGA* 's já abordada nesta dissertação;

3. Soldadura dos BGA`s (*voids*) - Os *voids* são bolhas de gás que se formam na soldadura e são considerados um dos defeitos mais prejudiciais para a fiabilidade a longo prazo da conexão intermetálica na eletrónica. Dessa forma tornou-se essencial a análise a este fenómeno como validação dos resultados anteriores.

Estas bolhas são em grande parte causadas pela quantidade de gases oriundos do fluxo de solda que fica retido na solda durante a refusão, sendo a localização e o tamanho dos *voids* os fatores chave que influenciam o desempenho e fiabilidade das juntas de solda.

A IPC-7095 (IPC, 2008) gere a especificação internacional para os critérios de aceitação de *voids* na soldadura. Nas situações em que existem vários espaços vazios, a dimensão total do *void* será o somatório da área do conjunto de *voids*. São assim definidos requisitos distintos para aceitação do tamanho dos *voids* mediante a sua localização na ligação intermetálica definida na Figura 47 .

Location of Void	Class I	Class II	Class III
Void in Solder (Solder Sphere)	60% of Diameter = 36% of Area	45% of Diameter = 20.25% of Area	30% of Diameter = 9% of Area
Void at Interface of Solder Sphere and Substrate	50% of Diameter = 25% of Area	35% of Diameter = 12.25% of Area	20% of Diameter = 4% of Area

Figura 47: Fonte: IPC 7095: Requisito para Classificação de *Void*s

4 – Descrição do Problema

Neste capítulo será abordada a problemática seguida por este estudo caso e os motivos para a sua realização. Dessa forma, realça-se o foco na avaliação do consumo de azoto na soldadura reflow e o impacto deste na qualidade da soldadura final do produto.

4.1 – Soldadura Lead-Free

Nos últimos anos as empresas têm procurado o aperfeiçoamento tecnológico, visando um alinhamento ambiental das empresas com as necessidades de proteção do meio ambiente e eficiência industrial (LaDou, 2006).

O comportamento das ligas de solda sem chumbo tem sido muito estudado e estão baseados nos princípios das ciências e engenharia dos materiais, contudo, este estudo é seguido e efetuado pela engenharia da qualidade no sentido de avaliar qualitativamente o risco dos diversos níveis de injeção de azoto no produto final.

A implementação da tecnologia de soldadura de componentes sobre superfície usando ligas de solda sem chumbo continuará utilizando a infraestrutura existente nas empresas montadoras. A utilização de boas práticas na fabricação de produtos eletrônicos determina o rendimento da produção e juntas de solda confiáveis nas montagens produzidas. A aparência da junta de solda usando as ligas sem chumbo é bastante diferente da obtida com a liga de estanho chumbo, porque a nova liga apresenta um aspeto rugoso, que lembra um defeito, se considerado o padrão anterior de aceitabilidade de boa solda que apresentava aspeto brilhante como exemplificado na Figura 48 e Figura 49.

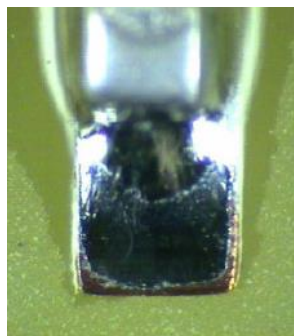


Figura 48: Exemplo Soldadura PB



Figura 49: Exemplo de Soldadura Lead Free

Os colaboradores da Delphi receberam formação na norma IPC A610 para absorverem o novo padrão de aceitação para a produção de montagens eletrónicas. Os materiais utilizados para a soldadura de componentes eletrónicos, as soldas em barra, as pastas de solda, as placas de circuito impresso e os componentes eletrónicos, devem estar adequados às diretrizes RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*).

4.2 - Diretiva RoHS

No ano 2003, a União Europeia publicou a diretiva RoHS (Restrição de Substâncias Perigosas) (Hickman, 2005).

A UE criou assim uma nova diretiva para proteção do meio ambiente e da saúde das pessoas que trabalham com equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE).

Esta legislação pretende eliminar a concentração de certas substâncias de equipamentos elétricos e eletrónicos que entram no âmbito da diretiva. Por conseguinte, os estados-membro da UE garantem que, a partir de 1 de Julho de 2006, os novos equipamentos elétricos e eletrónicos comercializados não conterão nenhuma das 6 substâncias proibidas (Costa, 2011):

- Chumbo
- Mercúrio
- Cádmio
- Crómio hexavalente
- Bifenilos Polibromados (PBB)

- Éteres Difenílicos Polibromados (PBDE)

A diretiva RoHS aplica-se a equipamentos das seguintes categorias:

- Aparelhos domésticos de grande porte;
- Aparelhos domésticos de pequeno porte;
- Equipamentos de IT e de telecomunicação;
- Equipamentos ao consumidor;
- Equipamentos de iluminação
- Ferramentas elétricas e eletrônicas;
- Brinquedos, equipamentos de desporto e lazer;
- Dispositivos médicos;
- Instrumentos de monitorização e controlo industrial;
- Dispensadores automáticos;
- Outros EEE não cobertos por qualquer das categorias acima.

A diretiva RoHS não se aplica, entre outros:

- Para instalações fixas de grande escala;
- Para ferramentas industriais estacionárias de grande escala;
- Para equipamentos projetados especificamente, e que devem ser instalados, como parte de outro tipo de equipamento que esteja excluído ou não caia dentro da abrangência desta diretiva, que pode cumprir sua função somente se fizer parte de tal equipamento, e que possa ser substituído somente pelo mesmo equipamento especificamente projetado;
- Para equipamentos necessários para a proteção dos interesses essenciais da segurança dos Estados Membros, incluindo armas, munições e material bélico destinado a objetivos militares especificamente.

4.3 - Azoto

Segundo Xia & Xie (2008), o azoto é utilizado para homogeneizar a atmosfera da estufa de soldadura *reflow*. Este é abastecido através de um tanque de azoto que contém um vaporizador, cujo objetivo é converter o azoto líquido frio em azoto em gás.

Quando o azoto está em utilização, vaporiza a -196 graus Celsius no interior do vaporizador e torna-se um gás. Em seguida, este gás de azoto é transportado através de um tubo de cobre especial para a estufa de *reflow*.

O azoto frio é aplicado diretamente para a zona de *reflow* em que a temperatura pode chegar a 250-270 graus Celsius. A injeção do azoto na máquina dá-se a 10-15 graus Celsius, o que pode causar alguns problemas de regulação da temperatura e, finalmente resultar numa grande variação na temperatura da solda. Esta dificuldade é evitada através da injeção de azoto na secção de pré-aquecimento do forno de *reflow* antes da pasta de solda atingir temperaturas de fusão.

Existem no mercado inúmeras pastas de solda com diversas composições que são defendidas como possíveis de soldarem eficazmente ao ar. Contudo, é pertinente salientar que a Delphi tem autorizadas apenas duas pastas de solda sem chumbo como uniformização de processos e ainda, não há, por parte das empresas concorrentes qualquer partilha dos resultados qualitativos com a aplicação de pastas alternativas do mercado. Daí a importância de internamente a Delphi estudar o impacto da aplicação de diferentes níveis de azoto na soldadura *reflow*.

As principais vantagens da utilização de azoto para soldadura *reflow* com solda sem chumbo são:

- Melhoria da qualidade de soldadura: tensão superficial superior assim como menor oxidação dos terminais dos componentes resultando no aumento da resistência do menisco de soldadura;
- Janela de Processo alargada: o processo de soldadura é menos sensível para defeitos de soldadura, melhorando assim os dispositivos produzidos compatíveis com a diretiva RoHS;
- Aparência visual solda será mais suave e brilhante, especialmente para pasta sem chumbo, tornando mais fácil para inspecionar e retrabalhar.

As principais desvantagens da utilização de azoto são os seguintes:

- Custo de Azoto: o aspeto mais importante do uso de azoto é o custo da instalação do tanque de azoto e o aluguer deste depósito para o uso e consumo, bem como constantemente reabastecimento do tanque com azoto líquido.

5 - Trabalho Desenvolvido

Neste capítulo é abordado o trabalho proposto para avaliação do impacto do azoto na soldadura reflow.

A Delphi tem vindo a realizar vários testes desde 2002 para definir uma estratégia padrão no uso da pasta sem chumbo. No entanto este foco requer o cumprimento de algumas premissas:

- Alinhamento com os requisitos de soldadura dos referenciais IPC A-610 classe 3;
- Desempenho equivalente e resultados como os processos de soldadura com chumbo;
- Uniformização de processos em todas as fábricas Delphi.

As especificações são baseadas nas necessidades dos clientes e da indústria, sendo que a Delphi tem como alvo o padrão de Classe 3 no referencial de soldadura IPC A610 apresentados anteriormente.

De forma a atender o requisito uniformização de padrões de injeção de azoto e pastas de solda entre fábricas da Delphi, foi delineado um plano de experiências gradual, de forma a abranger todos os *inputs* já referidos de carácter pertinente de cada fábrica.

5.1 - Impacto do Azoto no processo de Soldadura Reflow: Screening DOE

No seguimento da estratégia acima referida, no primeiro plano experiencial foram identificados como influentes para o estudo os seguintes fatores: pasta de solda (OM340; LF318), ambiente de *reflow* (4.000ppm `s; on air) e perfil da estufa (Cool; hot).

Este desenho de experiências segue o plano fatorial de Taguchi, com dois níveis, incluindo ainda, dois níveis de “ruído” nas experiências. São usadas cinco placas por cada experiência. 40 placas para “*low noise*” e 40 placas para “*high noise*” descritos na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4: Desenho de experiências

Trial	Pasta	Ambiente de reflow	Perfil
Trial 1	Alpha OM340	Air	Hot Profile
Trial 2	Henkel LF318D	Air	Hot Profile
Trial 3	Alpha OM340	Air	Cool Profile
Trial 4	Henkel LF318D	Air	Cool Profile
Trial 5	Alpha OM340	N2	Cool Profile
Trial 6	Henkel LF318D	N2	Cool Profile
Trial 7	Alpha OM340	N2	Hot Profile
Trial 8	Henkel LF318D	N2	Hot Profile

} 5 placas por trial

Tabela 5: Níveis de Ruído no DOE

Nível	Finish da placa	Deposição de pasta	Colocação componente	Tempo de espera
Low Noise	Pb Free HASL	Centrada	Centrado	<1 Hr
High Noise	OSP	Descentrada	Descentrado	>4 Hrs

Para a execução deste desenho de experiências foi delineada e encomendada uma placa OSP e outra Lead free designada como SEP010 ADP com a definição clara de *pad*'s e componentes necessários aos testes a efetuar.

Esta placa apresentada na Figura 50, foi especificamente requisitada ao fornecedor com oito *BGA*'s distintos e duzentos *pad*'s de diferentes tamanhos, como irão ser apresentados seguidamente. No total são um total de 80 placas, perfazendo 16 mil *pad*'s em estudo.

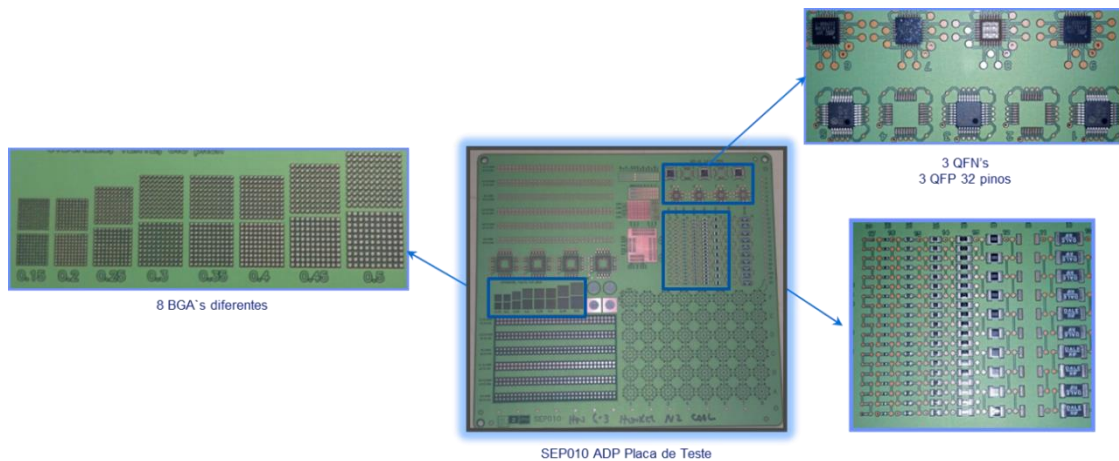


Figura 50: Placa de teste SEP010 ADP

A indústria eletrónica tem assistido a uma diminuição acentuada do tamanho dos componentes de montagem automática, o que explica a panóplia de componentes colocados durante esta série de experiências. Na Figura 51 podem-se observar os mais usados pela Delphi Braga, sendo o caso dos condensadores e resistências de tamanho 0402 (1.0 mm por 0.5 mm) responsáveis por sensivelmente 70% das peças inseridas no processo de montagem automática.

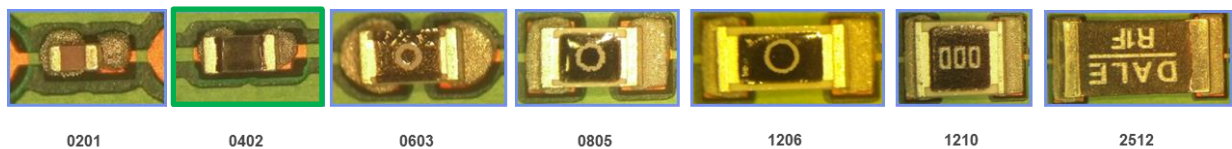


Figura 51: Diferentes tamanhos de componentes avaliados

Como já referido anteriormente nesta dissertação, o perfil de temperatura da estufa de *reflow* é um dos elementos principais para a qualidade do produto.

Devido à convivência de materiais com diferentes dimensões nas placas, foram definidos dois perfis de temperatura para a execução das experiências com a diferença entre as curvas de temperatura já abordados no ponto 3.7 desta dissertação.

5.1.1 - Avaliação de resultados

Quatro resultados eram tidos como variáveis de resposta das experiências:

- O resultado qualitativo medido pela máquina de inspeção ótica;
- A coalescência da solda dos BGA's;
- Observações do movimento do fluxo;
- Soldadura dos QFN.

5.1.2 - O resultado Qualitativo AOI (FTQ)

Não foram detetados quaisquer defeitos, obtendo-se um resultado de 100% de Yield. Contudo, as placas seriam ainda sujeitas a inspeção visual efetuada por operadores certificados pelas normas IPC A-610 de forma a validar as experiências. A Figura 52 e a Figura 53 representam visualmente a formação de uma soldadura aceitável concluindo que estes fatores não terão influência na formação de menisco dos componentes para a validação automática segundo as normas IPC A610.

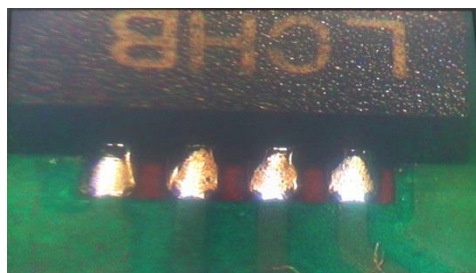


Figura 52: Soldadura QFN

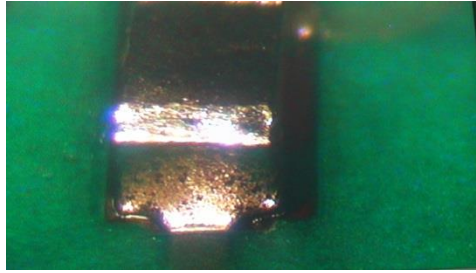


Figura 53: Soldadura 0402

5.1.3 - A coalescência da solda dos BGA's

Como já referido, as pastas de solda contêm fluxos cuja função é a de potenciar uma soldadura robusta e proteger as esferas de solda de oxidação causada pelo ambiente.

A falha de fluxo pode resultar em não-coalescência das esferas de solda nos *pad 's* como referido no ponto 3.7 desta dissertação.

O desenho de experiências foi focado em condições de transformação com "tensão" do fluxo de pasta para determinar se as diferenças podem ser observadas. A função do azoto é homogeneizar a atmosfera da estufa protegendo da oxidação.

Seguidamente foram inspecionadas visualmente todas as placas visando a análise da coalescência da pasta de solda seguindo os términos previamente apresentados e representados na Figura 54.

As observações à coalescência da pasta de solda propõe fornecer detalhes adicionais sobre como o fluxo se apresenta em condições significativamente diferentes após o ciclo de temperatura. A coalescência da solda é um indicador-chave da capacidade global de uma soldadura de elevada qualidade e fiabilidade que vá de encontro às expectativas e requisitos do cliente.

As condições do plano de experiências indicaram diferenças significativas a respeito de como o fluxo é consumido durante cada processo de *reflow*.

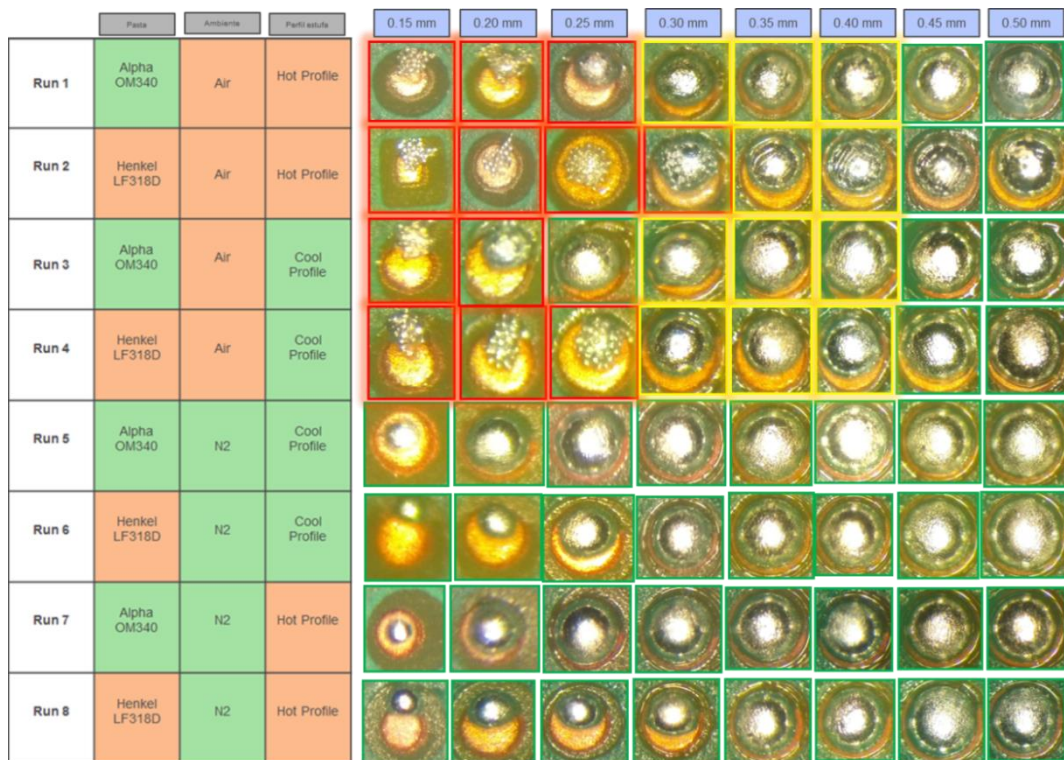


Figura 54: Resultados da Soldadura- Coalescência

Foram observados alguns pontos com a coalescência da pasta de solda não conforme, sendo apresentados, de seguida, os resultados diferenciados por tipo de pasta de solda.

A Figura 55 e a Figura 56 demonstram um bom desempenho de cada pasta em ambientes com azoto. Contudo, é patente uma observação dos resultados da pasta de solda Alpha OM340 em ambiente de azoto acima dos 90%, apresentando assim uma melhor condição de coalescência após ciclo térmico de *reflow*. Os resultados da pasta LF318D demonstram uma dispersão mais significativa centrado-se em 70%. Já relativamente à avaliação da coalescência em ambiente sem azoto verificam-se resultados menos eficientes, com a pasta OM340 a apresentar sensivelmente 60% dos *pad*'s em situação de coalescência aceitável e a LF318D com 20% dos *pad*'s em situação semelhante.

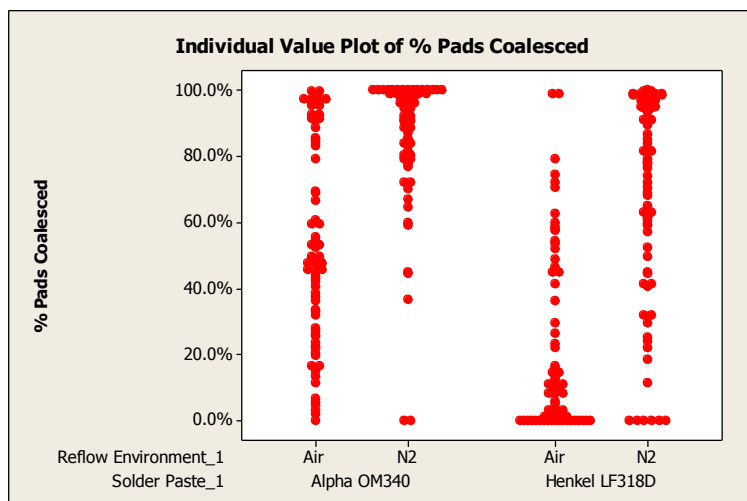


Figura 55: Percentagem de *Pad*'s coalescidos

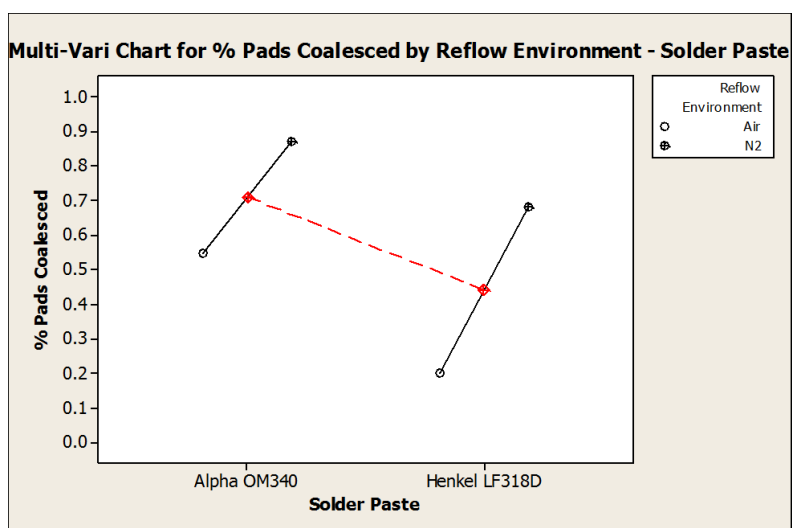


Figura 56: *Pad*'s coalescidos entre pastas e ambiente

Como se pode observar na Figura 57, as principais conclusões retiradas deste conjunto de experiências relativamente às pastas de solda foram:

- A pasta de solda Alpha OM340 apresenta melhores resultados de soldadura quer em ambiente inerte quer ao ar, embora, os resultados da soldadura sob ambiente com azoto apresentem resultados mais satisfatórios;
- Não é observado um impacto significativo entre os dois perfis de estufa usados nos resultados finais de coalescência;

- Como já referido, os resultados de coalescência em ambiente inerte são mais satisfatórios do que em ambiente sem azoto;
- O tamanho de *pad's* de 0,15mm e 0,20mm demonstram ter resultados significativamente menos conseguidos do que os outros tamanhos mais largos.

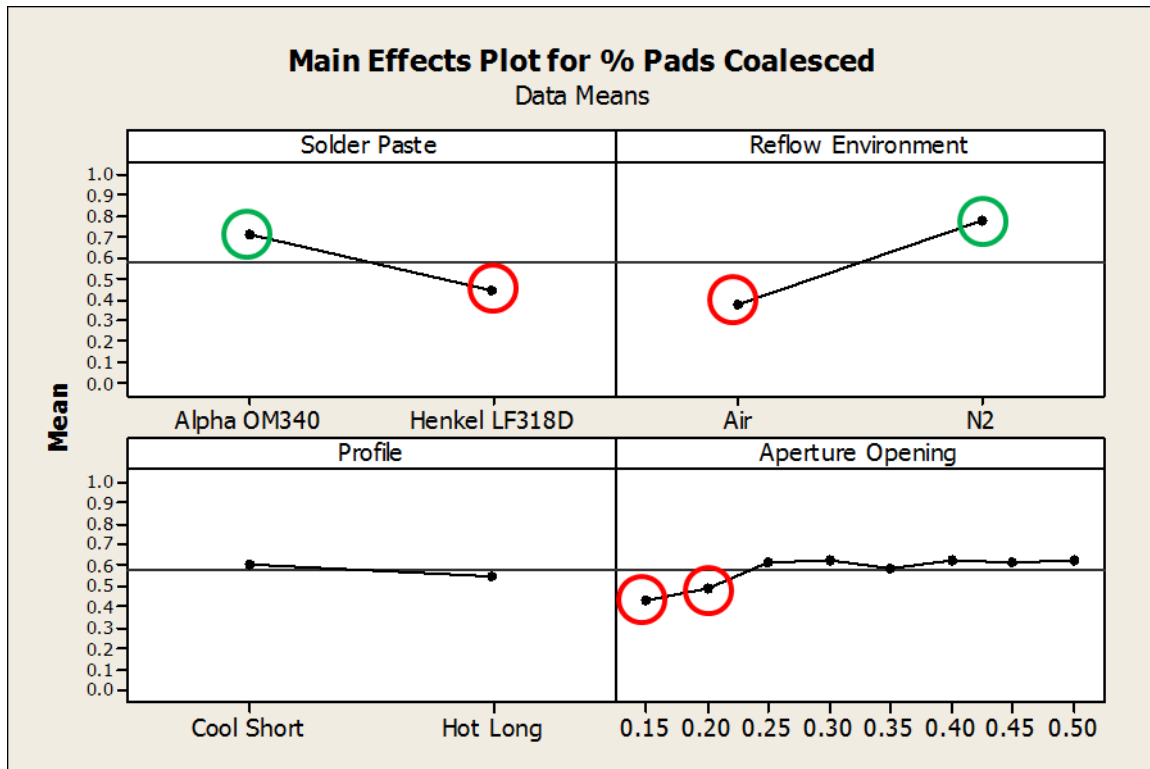


Figura 57: *Pad's* coalescidos - relação entre fatores

Em suma, os resultados de dados da coalescência permitiram perceber que o tamanho do *Pad* é o fator mais significativo para os problemas de coalescência, e que a pasta de solda Alpha OM340 é mais robusta do que a Henkel LF318, quer sob ambiente de azoto, quer em soldadura ao ar.

5.1.4 - Observações do movimento do fluxo

As condições criadas indicaram diferenças significativas a respeito de como o fluxo é consumido durante cada processo de *reflow*.

As observações da movimentação do fluxo de solda são importantes uma vez que vários tipos de componentes como os QFN`s exigem que a solda flua através dos *pad`s* para formar uma junta de solda. Usando as mesmas amostras do plano anterior foi possível determinar que as amostras da pasta de solda Henkel LF318D soldadas ao ar não sofreram qualquer movimento. As amostras da pasta de solda Alpha OM340 exposta ao ar melhoraram o movimento de fluxo. Contudo, o comportamento do fluxo sob ambiente inerte (azoto) melhora relativamente à soldadura ao ar.

5.1.5 - Soldadura dos QFN`s

Como já referenciado, o QFN representado na Figura 58 é um componente de soldadura crítica, sendo considerado um indicador chave sobre o desempenho da soldadura devido à sua criticidade de manufatura. É um invólucro de circuitos integrados ou de módulos, do tipo plano, com conexões nos quatro lados, mas sem terminais, podendo ou não possuir um dissipador com plano-terra sob o chip.

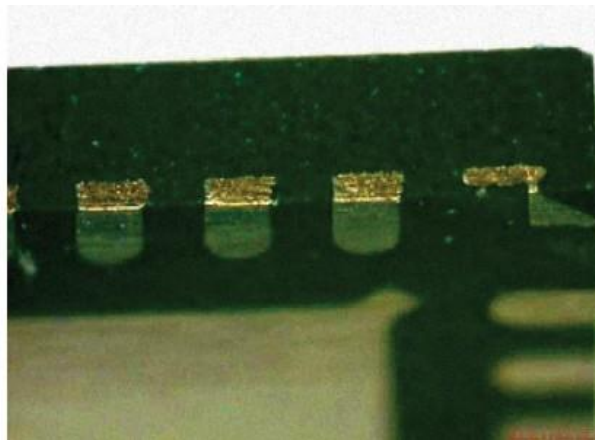


Figura 58: Design de QFN

O *layout* crítico do QFN cria dificuldade na aplicação de solda e soldadura garantindo o cumprimento das especificações Delphi de cobertura de 25% do menisco (Figura 59).

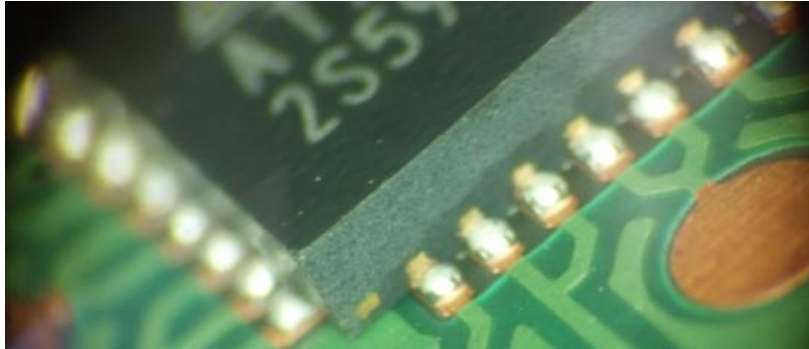


Figura 59: Soldadura de QFN

Como se pode observar pelo conjunto de imagens abaixo (Figura 60), ambas as pastas de solda demonstraram dificuldade em obter uma soldadura satisfatória em ambiente sem azoto.



Figura 60: Soldadura QFN – relação entre fatores

Deste plano de experiências emergiram dilacões sobre o impacto do azoto na soldadura reflow:

- Os *pad*'s abaixo de 0.300 milímetros demonstram dificuldades de coalescência da solda após ciclo de temperatura na estufa de *reflow*;
- O perfil de temperatura mais suave (*Cool*) conseguiu demonstrar melhor soldabilidade da pasta de solda;
- A pasta de solda Alpha OM340 revelou resultados mais satisfatórios, e dessa forma, viria a ser a selecionada para integrar o próximo desenho de experiências.

Como conclusão é apresentada na Figura 61 a avaliação de risco para a qualidade mediante a não utilização de azoto na soldadura por *reflow*.

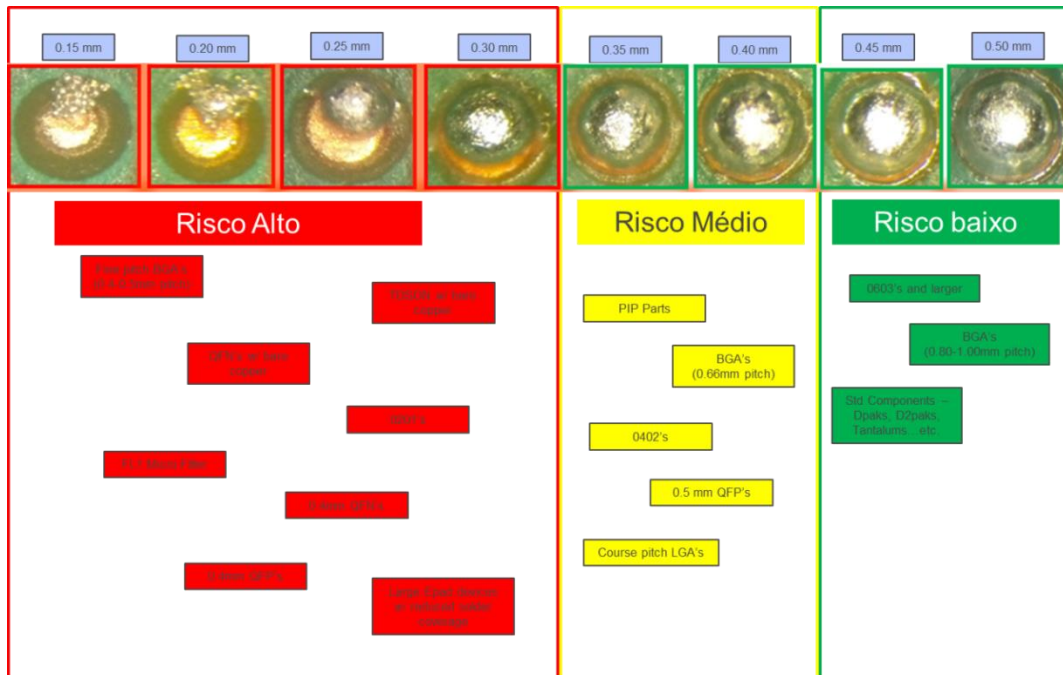


Figura 61: Soldadura sem Azoto - Avaliação de Risco

5.2 - Impacto do Azoto no processo de Soldadura Reflow: DOE II

Após a análise ao resultado do estudo apresentado anteriormente foi decidido realizar um desenho de experiências em que o fator pasta de solda seria estático, ao ser usada a pasta de solda OM340 (que apresentou resultados com melhor performance) e um perfil de temperatura da estufa de *reflow* com uma curva moderada reduzindo assim o plano de experiências, centrando-se na coalescência da solda como uma adenda ao estudo similar realizado anteriormente. Este novo estudo vai concentrar-se em resultados com diferentes níveis de azoto na estufa de *reflow* e no acabamento da placa sendo os acabamentos visados o *Imersion Tin* e o *OSP* como representado na Tabela 6.

De forma a garantir a fiabilidade do estudo procedeu-se à elaboração de um MSA aos valores em PPM's (partes por milhão) provenientes do analisador de azoto nas estufas. Os valores propostos são: 100ppm's, 18.000ppm's, 33.000ppm's, 50.000ppm's e 210.000ppm's (sem azoto).

Tabela 6: DOE Fatores e Níveis

Factor:	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7	Nivel 8
O2 ppm	100	18.000	33.000	50.000	210.000			
PCB Finish	Immersion Tin	OSP Copper						
Reflow Pre-Condition	0	1						
BGA Pad Diametro	0.15mm	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50

Os valores de cada nível foram registados após 15 minutos da mudança de produto, de forma a garantir a estabilização da atmosfera no interior da estufa de *reflow*, em dois dias distintos. Pode-se observar estes valores na Tabela 7. Contudo, os valores da soldadura ao ar não são demonstrados pelo facto de não haver azoto injetado, logo, a estufa encontra-se a trabalhar com uma concentração de oxigénio de 21% que a nível de valor máquina são os 210.000ppm`s.

O objetivo do primeiro nível foram os 100ppm`s, atingindo-se uma média muito próxima desse valor, de 104ppm`s. Para tal foi parametrizada a injeção de 60 m³/hr de azoto.

O segundo nível definiu-se em 18.000ppm`s como objetivo, atingindo uma média de 18,900ppm`s com a injeção de 35 m³/h de azoto.

O terceiro nível de 33.000ppm`s teve como média os 34.300ppm`s com uma injeção de 27 m³/h de azoto.

O quarto nível e ultimo a ser monitorizado tinha como objetivo os 50.000ppm`s, obtendo-se uma média de 49,910ppm`s com a injeção de 20 m³/h de azoto.

Tabela 7: Valores MSA das leituras do O2

	Leituras	Trial Run 1:	Trial Run 2:
1 100ppm ` s	1	138	142
	2	99	125
	3	83	112
	4	75	104
	5	65	101
2 18000ppm ` s	1	17,900	20,100
	2	17,900	19,900
	3	18,100	19,900
	4	18,400	19,600
	5	18,200	19,100
3 33000ppm ` s	1	35,000	33,200
	2	35,400	33,400
	3	35,300	33,800
	4	35,200	33,600
	5	35,200	33,600
4 50000ppm ` s	1	51,200	46,600
	2	52,000	47,700
	3	52,100	48,000
	4	52,800	48,100
	5	52,300	48,300

O gráfico representado na Figura 62 indica os níveis de partes por milhão (ppm) de oxigênio para as quatro configurações de valores de azoto propostas. Cada uma das quatro configurações foi testada por duas vezes após configuração do analisador e injetor de forma a confirmar a repetibilidade de valores e foram ainda efetuadas cinco análises a cada mudança de produto. A variação das leituras aumentou à medida que a injeção de azoto diminui. A Figura 62 revela uma clara separação em valores de concentração de oxigênio entre as diferentes configurações.

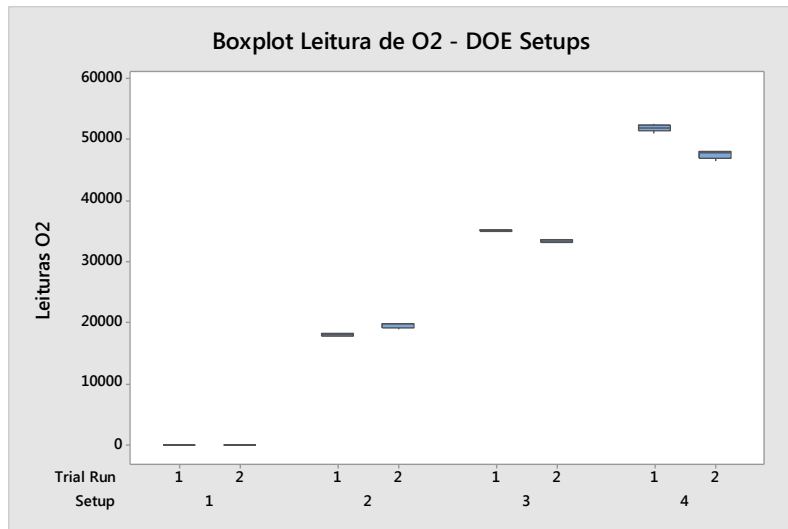


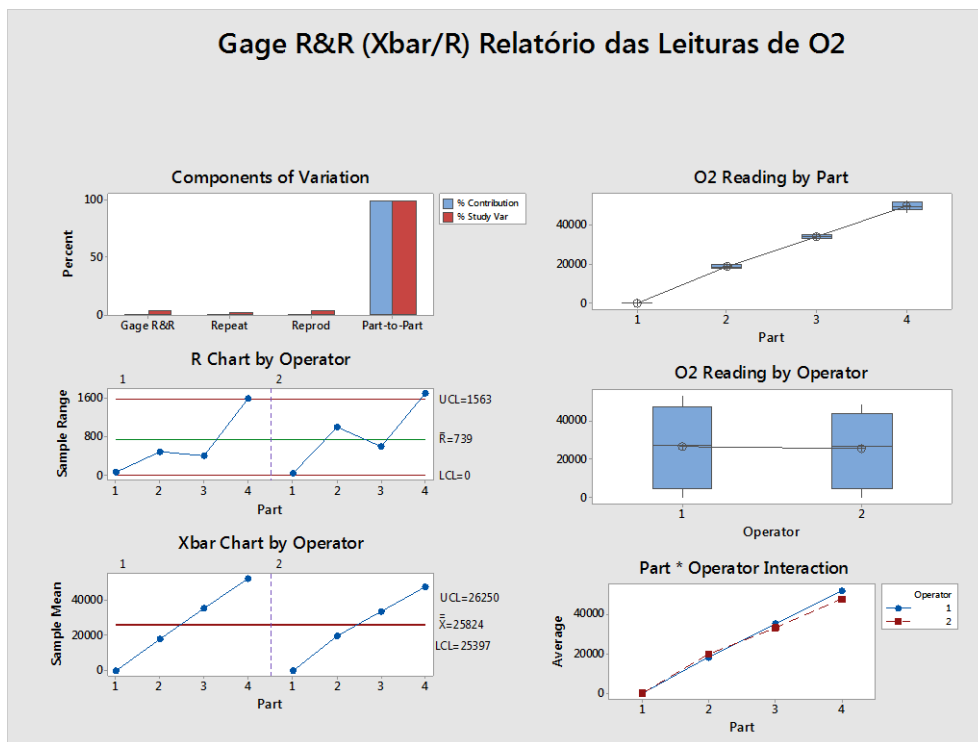
Figura 62: MSA às leituras de O2

Os resultados deste MSA foram aceitáveis. Os componentes do gráfico de variação são um resumo gráfico dos resultados do estudo de capacidade, sendo as fontes de variação que são representados no gráfico as seguintes:

- Gage R&R - variação imputada ao sistema de medição quando vários operadores utilizam a mesma ferramenta;
- Repetibilidade - variabilidade nas medições obtidas quando a mesma parte é medida várias vezes pelo mesmo operador;
- Reprodutibilidade - variabilidade nas medições obtidas quando o mesmo elemento é medido por diferentes operadores;
- Variação Part to Part - variabilidade nas medições em diferentes partes.

O gráfico R-Chart representado na Figura 63 apresenta as medidas efetuadas pelos operadores e se estas são feitas de forma consistente. Um ponto fora do limite de controlo superior (UCL) indicaria que o operador não está a medir o fluxo de forma consistente. O cálculo da UCL inclui o número de medições por um operador de um lado, e covariação por outro. Se os operadores medem de forma consistente, então a diferença entre as medições mais altas e mais baixas é pequena em relação à variação do estudo, e os pontos devem estar dentro dos limites de controlo.

De salientar que é observado um ponto fora dos limites de controlo superior, isto porque, a configuração número quatro tinha como nominal os 50.000 ppm`s. Dessa forma verifica-se uma maior volatilidade na homogeneização do ambiente da estufa, havendo uma maior dispersão nos registos de monitorização.



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	835,5	5013	3,75
Repeatability	315,1	1891	1,42
Reproducibility	773,8	4643	3,48
Part-To-Part	22245,9	133475	99,93
Total Variation	22261,5	133569	100,00

Number of Distinct Categories = 37

Figura 63: Relatório das leituras de O2

5.2.1 - Avaliação de resultados

Três resultados foram considerados como variáveis de resposta das experiências:

- O resultado qualitativo medido pela máquina de inspeção ótica;
- A coalescência da solda dos BGA`s;
- Soldadura dos BGA`s (*voids*).

5.2.2 - O resultado Qualitativo AOI

Não foram detetados quaisquer defeitos, obtendo-se um resultado de 100% de Yield com resultados de soldadura como os mostrados na Figura 64. Contudo, as placas seriam ainda sujeitas a inspeção visual de forma a validar as experiências.



Figura 64: Soldadura de condensador 0402

5.2.3 - A coalescência da solda dos BGA`s

Como já referido anteriormente, as pastas de solda contêm fluxos cuja principal função é a de promover uma soldadura robusta e evitar a oxidação das esferas de solda nos *pad`s*.

Podemos aferir que fatores como o acabamento do PCI ou a condição de *reflow* não demonstram qualquer significância. Como se pode observar na Figura 65 e a Figura 66, o tamanho das aberturas da tela em condições de *reflow* com elevado valor de O₂ revelou dificuldades na soldabilidade da pasta de solda.

Pode-se então aferir que:

- Nos resultados finais de coalescência dos *Pad's* dos BGA's não há um impacto considerável do acabamento das placas. No entanto, observam-se resultados ligeiramente melhores nas observações de OSP;
- Já o valor da concentração de azoto do interior da estufa por *reflow* apresentou alguma significância, ao observar-se uma diminuição dos *pad's* coalescidos com a diminuição do azoto.
- O fator com maior nível de significância foi o tamanho dos *pad's* em correlação com a atmosfera da estufa. Isto é, há uma boa coalescência generalizada até aos 33.000 ppm's. Com 50.000ppm's no interior da estufa são observadas dificuldades de coalescência nos *pad's* de 0,150mm. Já em ambiente de soldadura sem azoto verificam-se dificuldades de *reflow* a partir dos 0,250mm de tamanho de *pad*.

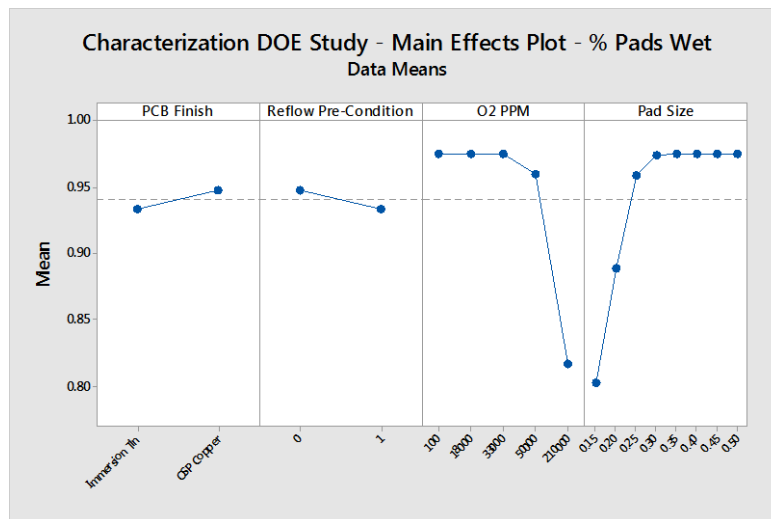


Figura 65: Plot de Relação entre fatores e coalescência

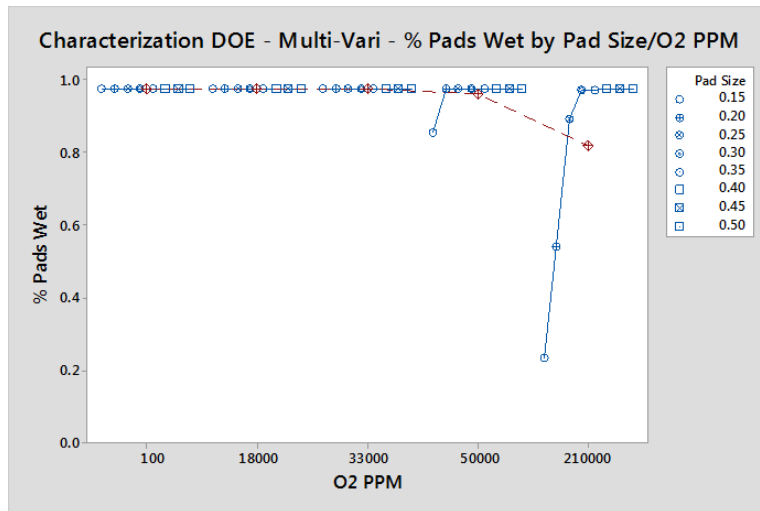


Figura 66: Multi-Vari de Coalescência por *Pad* e Concentração de Azoto

Pode-se observar na Figura 67 os resultados práticos das diversas configurações de ambiente de *reflow* na estufa.

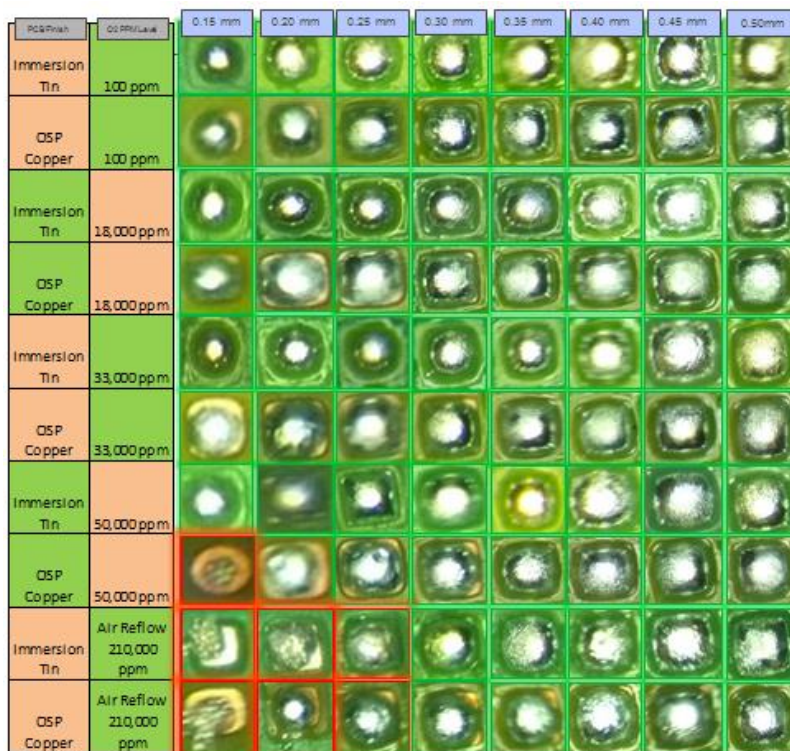


Figura 67: Observação gráfica da Coalescência

5.2.4 - Soldadura dos BGA`s (voids)

Como já referido, os *voids* são bolhas de gás que se formam na soldadura e que influenciam o desempenho e fiabilidade das juntas de solda.

Como salientado por Previti (2010), o tamanho é o fator mais crítico, tendo impacto negativo na junta de solda tornando-se uma fonte de aprisionamento com efeitos de *stress*, barreira térmica e degradação elétrica, restringindo o caminho do fluxo de corrente. *Voids* maiores reduzem a robustez da soldadura em relação às pequenas, porque a incidência de falha aumenta dramaticamente à medida que a espessura do material da solda entre a bolha e a bola exterior diminui, sendo que, este modo de falha torna-se mais grave, à medida que se aproxima de uma das interfaces de ligação.

A IPC-7095 (IPC, 2008) gere a especificação internacional para os critérios de aceitação de *voids* na soldadura. Com o recurso ao Raio-X procedeu-se à avaliação de 16 placas com BGA`s com a utilização de três níveis de azoto - 100, 18000 e 33000ppm`s, visto serem aqueles que nos testes anteriores não evidenciaram problemas de soldabilidade. Seguidamente avaliou-se a percentagem de *voids* do BGA por dois operadores, sendo escolhidos os pontos de soldadura com os *voids* de maior dimensão por componente. O componente escolhido para avaliação foi um BGA, como representado na Figura 68 com base em problemas históricos de soldadura.

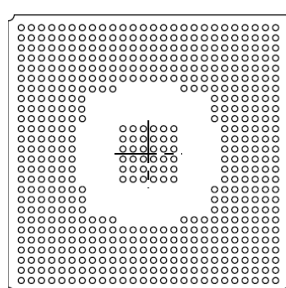


Figura 68: *Design* de BGA 544 (Texas Instruments)

Como se pode observar pela Figura 69, constata-se que a maior variação é explicada pela variação *part-to-part*. A média no desvio da observação é de 1,65% e a média do tamanho do *void* é de sensivelmente 6%. O tamanho dos *voids* evidencia um aumento à medida que se diminui a

concentração de azoto no interior da estufa como revela a Figura 70. Os elementos que procederam à avaliação das medidas apresentaram consistência nas suas classificações.

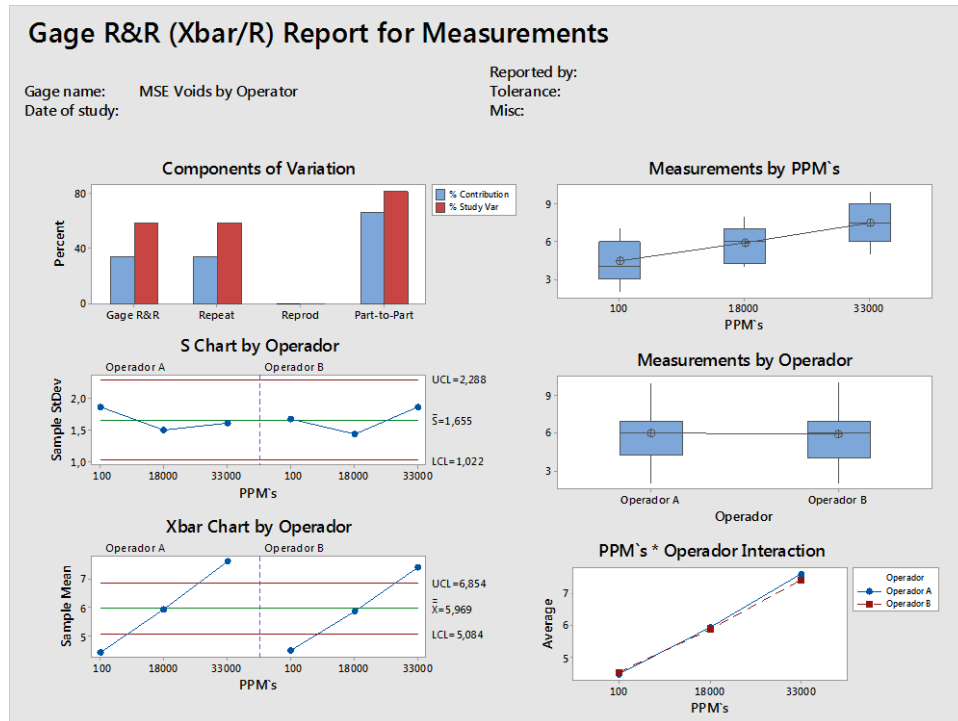


Figura 69: MSA *Void*s by Operator

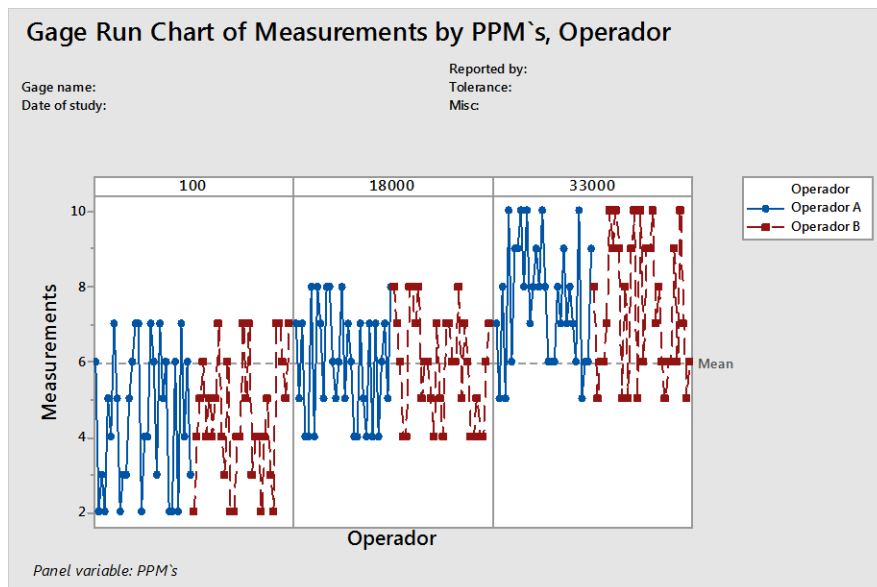


Figura 70: % *Void* por PPM's e operador

Como forma de certificar este MSA foram efetuados cortes metalográficos a uma placa produzida com 33.000 ppm 's.

Os cortes foram feitos na coluna exterior das bolas de solda e após análise ao microscópio com uma aproximação de 200 vezes foram possíveis observar as soldaduras representadas na Figura 71. Estas soldas encontram-se dentro das especificações previamente definidas com base na norma IPC-7095.

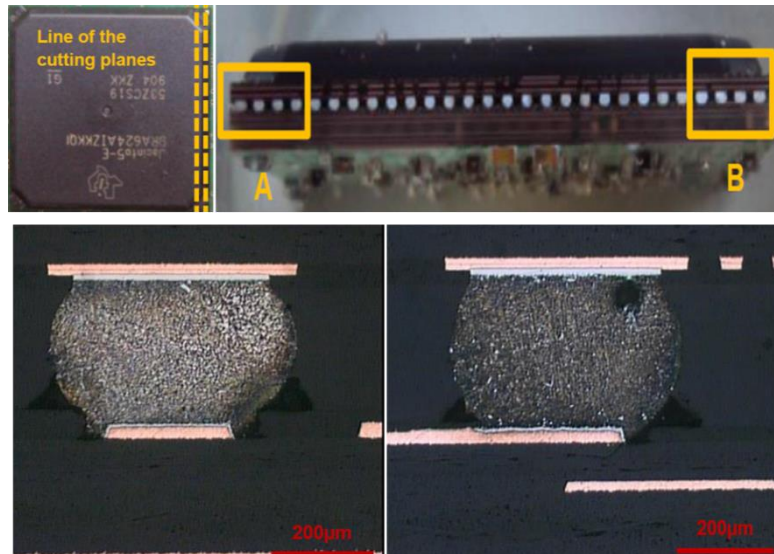


Figura 71: Cortes metalográficos BGA 's

6 - Conclusões e Considerações Finais

6.1 - Enquadramento

O objetivo geral desta dissertação consistiu em avaliar a necessidade da utilização do azoto em produtos eletrónicos com solda sem chumbo nos processos de soldadura por *reflow*.

Os custos de aplicação deste elemento nas estufas por *reflow* constituí um elevado custo para as empresas. A predefinição da Delphi relativamente á soldadura sem chumbo requeria ambientes 4.000ppm`s de concentração de azoto no interior das estufas, tornando-se assim pertinente o estudo da relação entre o ambiente de soldadura e a qualidade final do produto.

Para tal, a execução deste projeto contou com a interação constante de grupos multidisciplinares das diferentes fábricas Delphi, desenvolvimento, equipa de 6 sigma internacional e fornecedores para o delineamento do plano de experiências e análise de resultados.

6.2 - Conclusão

A elaboração deste trabalho permitiu a aplicação da ferramenta estatística 6 sigma de Desenhos de Experiências como base de compreensão do impacto do azoto na soldadura *reflow* com os diversos elementos de produção característicos á organização Delphi que foram apresentados no decorrer desta dissertação. Foi ainda possível adquirir uma melhor perceção sobre o comportamento das soldas sem chumbo usadas atualmente na organização Delphi, assim como, uma estratégia de uniformização internacional para a utilização da pasta de solda *Alpha Metals OM340* que revelou resultados qualitativos mais satisfatórios na análise ao output do Desenho de experiências realizado.

Durante o trabalho realizado foi possível aferir a dificuldade de gestão das placas com o acabamento *Organic Surface Protection (OSP)* por motivos de oxidação dos *pad`s* das placas. Desta forma a estratégia da empresa foca na utilização de acabamentos que transmitam mais garantias qualitativas de soldadura e durabilidade como o caso do *Imersion Tin*.

O tamanho das aberturas de tela é um dos fatores controláveis com uma influência importante no resultado final das variáveis de resposta. Com a análise à coalescência foi possível medir o impacto deste fator. As aberturas com uma dimensão inferior a 300 micrómetros revelaram dificuldades de *reflow* quando o nível de concentração de azoto estava em 33.000ppm`s. Tomou-se então como referência o segundo nível de 10.000ppm`s como objetivo, em que atingindo uma média de 18,900ppm`s de ambiente no interior da estufa que garantia as condições para a fiabilidade de processo desejada.

Com a passagem de 4.000ppm`s para 10.000ppm`s de ambiente de oxigénio (menos azoto) nas estufas de *reflow* foram alcançados os objetivos traçados para a realização deste projeto na empresa em questão sem se verificar qualquer impacto na qualidade. O consumo médio diário passou assim de 3446m³ injetados nas estufas para 2477m³ como se pode observar na Figura 72. Esta redução é de sensivelmente 30%, refletindo-se na diminuição dos custos fixos mensais da empresa.

Line	Oven	Status (Dec_14)		Status (Fev_15)		Saving m3/h (10000ppm)	N2 Utilization	Consumptions 4000	Consumptions 10000	
		N2 flow (m3/h)	O2 Status (ppm)	N2 flow (m3/h)	O2 Status (ppm)					
4	Electrovert	24	4000	16	10000	8	100%	576	384	
5	Electrovert	24	4000	14	10000	10	100%	576	336	
8	Electrovert	26	4000	16	10000	10	95%	593	365	
10	Electrovert	28	4000	24	10000	4	40%	268,8	230	
2	Rehm	22	4000	20	10000	2	70%	370	336	
3	Rehm	15	4000	9	10000	6	40%	144	86	
15	Rehm	25	4000	18	10000	7	100%	600	432	
17	Rehm	13	4000	8	10000	5	10%	31,2	19,2	
1	Ersa	15	2000	15	2000	0	50%	180	180	
7	Ersa	15	2000	15	2000	0	30%	108	108	
								m3 consumed	3446	2477

Figura 72: Consumos de Azoto por estufa

De salientar o sucesso deste projeto na transferência das práticas de redução da injeção de azoto para a soldadura por *reflow* com pasta sem chumbo para as outras fábricas do grupo Delphi, assim como, as poupanças em termos monetários associadas a esta redução sem impacto na qualidade final do produto, garantindo assim a proteção da satisfação do cliente.

6.3 - Limitações

A aplicação deste estudo de caso em ambiente industrial foi acompanhada por oportunidades de melhoria do projeto devido a questões intrínsecas à realidade Delphi:

- Este trabalho foi selecionado como referência para a realidade da Delphi, passando assim a ser incluídas variáveis como a pasta de solda *Henkel LF318* utilizada por outras fábricas que não a Delphi de Braga;
- A placa de teste SEP010 ADP foi elaborada de forma a abranger a panóplia de materiais usados transversalmente por todas as fábricas Delphi independentemente do tipo de produto, antenas, autorrádios, GPS, entre outros.
- O primeiro desenho de experiências (*screening*) serviu para selecionar as variáveis com a maior influência nos resultados qualitativos com a conclusão de que o fator pasta de solda seria estático ao ser usada a pasta de solda OM340 que apresentou resultados com melhor performance e um perfil de temperatura da estufa de *reflow* com uma curva moderada. Este novo estudo centrou-se na coalescência da solda como uma adenda ao estudo similar realizado anteriormente, avaliando os diferentes níveis de azoto na estufa de *reflow* e no acabamento da placa sendo os acabamentos visados o *Imersion Tin* e o *OSP*.

De salientar ainda, como patente na Figura 72, as estufas 1 e 7, da marca Ersa, não são passíveis de regulação, tendo uma parametrização fixa nos 2.000ppm `s o que impossibilitou a implementação a 100% deste projeto na produção.

6.4 - Desafios Futuros

No seguimento da melhoria contínua dos processos, qualidade e custos é identificado pela empresa o consumo do azoto como um potencial relevante para estudo e trabalho. Dessa forma, na prossecução de novos valores de consumos de azoto será necessário ter em conta certas premissas identificadas durante este estudo de caso:

- Internamente é premente o estudo dos produtos que se encontram fora da condicionante de aberturas de tela inferiores a 300 micrómetros de forma a potenciar a eliminação da utilização de azoto durante a soldadura dos mesmos;
- Cabe à Delphi Braga, mediante a sua estratégia de substituição de parque de máquinas

equacionar a substituição das estufas sem regulação de injeção de azoto de forma a possibilitar o estudo do impacto do azoto na soldadura por *reflow* em produtos que estão agregados unicamente às linhas em causa;

- Foram observadas dificuldades de *reflow* a partir dos 33.000ppm 's, logo, há ainda espaço para avaliar a definição e estudo do impacto do azoto em valores de 15.000ppm 's na soldadura por *reflow*;
- Para trabalhos futuros é ainda sugerido o estudo de novas ligas de pasta de solda sem chumbo visto hoje serem bastante tradicionais na soldadura para aplicação em eletrónica e também para outras aplicações industriais devido às normas RoHS. Estas ligas têm propriedades de soldabilidade e coberturas de sólidos como o cobre realmente adequadas para a indústria de produtos eletrónicos, contudo, ao requerem impreterivelmente a utilização de azoto para homogeneização do ambiente durante o processo de *reflow* para impedir a oxidação das ligações intermetálicas criam uma despesa adicional às organizações de produção da industria eletrónica. Estas melhorias potenciariam uma vantagem competitiva de mercado quer aos fornecedores, quer aos utilizadores deste tipo de tecnologia.

7 - Bibliografia

- Antony, J., Chou, T.-Y., & Ghosh, S. (2003). Training for design of experiments. *Work Study*, 52(7), 341-346. doi:10.1108/00438020310502642
- Castro, P. M. (1999). TAGUCHI'S METHOD: QUALITY CONTROL WITH A NON-CONVENTIONAL USE OF DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) Lisboa: Instituto Português de Administração de Marketing
- Costa, L. H. (2011). A diretiva RoHS e os desafios para o seu atendimento no sector eletroeletrónico (pp. 45).
- DA, H. E. (1998). The behavior of solder pastes in stencil printing with vibrating squeegee. In N. N. EKERE & M. A. CURRIE (Eds.), (v.21 ed., Vol. IEEE Transactions on Components). New York: IEEE Transactions on Components.
- Dey, S. (2013). Applications of Six Sigma in Electronics Industry – A case study. In S. Sharma (Ed.), (Vol. Volume 2). International Journal of Engineering Science and Innovative Technology.
- Doro, M. M. (2004). Sistemática para implementação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de placas de circuito impresso (pp. 152). Universidade federal Santa Catarina: Universidade Federal Santa Catarina.
- Fonseca, J. (2013). Desafios Técnicos e Empresariais - Diretrizes WEEE & RoHS Brasil: EIDorado - Evolução tecnológica.
- Goh, T. N. (Quality Engineering, (2002). The Role of Statistical Design of Experiments in Six Sigma: Perspectives of a Practitioner (Vol. (2002), pp. 13). Industrial and Systems Engineering Department, National University of Singapore, Singapore 119260: Quality Engineering.
- Goosey, M. (2005). Soldering considerations for lead-free printed circuit board assembly – an Envirowise Guide. *Circuit World*, 31(3), 40-44. doi:10.1108/03056120510585063
- Harrison, M. R., Vincent, J. H., & Steen, H. A. H. (2001). Lead-free reflow soldering for electronics assembly. *Soldering & Surface Mount Technology*, 13(3), 21-38. doi:10.1108/09540910110407388
- Hickman, B. (2005). Manual Técnico e Legislação RoHS (Vol. versão 2): RoHS Directive.
- IPC. (2008). IPC-7095- Design and Assembly Process for BGA`s. Association Connecting Electronics Industries: IPC.

- IPC, R. S. o. (October 2003). IPC 7711/7721 - Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies. IPC Standards: IPC,3000 Lakeside Drive, Suite 309S Bannockburn, Illinois.
- Jiju, A. (2012). A SWOT analysis on Six Sigma: some perspectives from leading academics and practitioners. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61(6), 691-698. doi:10.1108/17410401211249229
- John, M., Edward, A. A., & Venkat, V. (2012). The continuing evolution of Lean Six Sigma. *The TQM Journal*, 24(6), 542-555. doi:10.1108/17542731211270106
- Jones, B. (2011). OPTIMAL DESIGN OF EXPERIMENTS: A case study Approach. In P. Goos (Ed.). John Wiley and Sons. EUA: John Wiley and Sons. EUA.
- LaDou, J. (2006). Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(3), 211-219. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2006.02.001>
- Montgomery, D. C. (2007). Design and Analysis of Experiments (Vol. 5). United States of America: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2009). Introduction to STATISTICAL QUALITY CONTROL (Vol. 6). United States of America: John Wiley & Sons.
- Previti, M. (2010). Four Ways to Reduce Voids in BGA Package. In M. Holtzer (Ed.). SMTA.
- Pyzdek, T. (2003). Uma Ferramenta em busca do defeito zero. United States of America: HSM Management.
- Renaud, G. (2012). SMT troubleshooting guide. Global Headquarters, 109Corporate Boulevard, South Plainfield, NJ 07080, USA: Cookson Eletronics.
- Shu, M.-H., Hsu, B.-M., & Hu, M.-C. (2012). Optimal combination of soldering conditions of BGA for halogen-free and lead-free SMT-green processes. *Microelectronics Reliability*, 52(11), 2690-2700. doi:10.1016/j.microrel.2012.06.033
- Sitek, J., Rocak, D., Bukat, K., Fajfar-Plut, J., & Belavic, D. (2004). A comparison of the quality of lead-free solder pastes. *Soldering & Surface Mount Technology*, 16(3), 22-30. doi:10.1108/09540910410562491
- Standard, I. (2012). IPC 7527 Requirements for Solder Paste Printing. Association Connecting Electronics Industries: IPC Standards.

- Takji, G., & Ekere, N. N. (2010). Investigation of the effect of nitrogen and air atmospheres on solder wettability of plasma-treated HASL finish PCBs. *Soldering & Surface Mount Technology*, 22(3), 17-21. doi:10.1108/09540911011054154
- Tsai, T.-N. (2012). Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study. *Applied Soft Computing*, 12(8), 2601-2613. doi:10.1016/j.asoc.2012.03.066
- Xia, Y., & Xie, X. (2008). Reliability of lead-free solder joints with different PCB surface finishes under thermal cycling. *Journal of Alloys and Compounds*, 454(1-2), 174-179. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.12.098>
- Yin, R. K. (1994). Estudo de caso: planejamento e métodos / Case study research: design and methods. OSMOS Corporation, 7475 Wisconsin Avenue, Bethesda, MD 20814, USA: ELSEVIER.
- Zhong, Z. W., Arulvanan, P., & Shi, X. Q. (2005). Lead-free PCB assembly and effects of process conditions on the profile and reliability of solder joints. *Soldering & Surface Mount Technology*, 17(4), 33-37. doi:10.1108/09540910510630412
- Zucker, D. (2009). How to Do Case Study Research (pp. 17). University of Massachusetts: University of Massachusetts.