

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM QUALIDADE E SEIS SIGMA**

VANESSA FREITAS REGIS DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA PARA A REDUÇÃO DE
RETRABALHO EM JUNTAS SOLDADAS EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM
FCAW: ESTUDO DE CASO**

**SÃO LEOPOLDO
2016**

Vanessa Freitas Regis dos Santos

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA PARA A REDUÇÃO DE
RETRABALHO EM JUNTAS SOLDADAS EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM
FCAW: ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso de
Especialização apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
Especialista em Qualidade e Seis Sigma,
pelo Curso de Especialização em
Qualidade e Seis Sigma da Universidade
do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Jacinto Ponte Junior

São Leopoldo

2016

AGRADECIMENTOS

Aos membros do projeto, pelas discussões, análises e esforços para aplicação da metodologia Seis Sigma e para o atingimento dos resultados deste trabalho.

A todos os colegas do setor da Qualidade e toda a equipe da Solda que contribuíram fortemente para a realização deste projeto.

Ao Prof. Jacinto Ponte Jr., pela forma simples e prática de transmitir o conhecimento.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

O elevado grau de competição imposto pelo mercado tem gerado nas empresas uma constante e maciça busca por melhorias contínuas e radicais em seus processos. Desta forma, a redução e/ou eliminação das fontes de perdas que afetam às organizações e a busca por oportunidades de melhorias constituem-se em importante mecanismo de aumento do desempenho e potencial competitivo. Diante deste cenário, o Seis Sigma vem sendo adotado como uma metodologia estruturada e altamente focada na redução da variabilidade dos processos, incremento da qualidade e sucesso organizacional, combinada ao uso do pensamento estatístico e na busca de resultados financeiros. A empresa foco deste estudo apresentava problemas quanto ao índice de retrabalho gerado no processo de solda, devido este estar acima das tolerâncias definidas nas normas e especificações técnicas do Cliente. O índice de retrabalho em juntas soldadas no início do projeto era de 5,35% e a tolerância definida pelo Cliente era de no máximo 2,5% de retrabalho neste processo. Este índice de 5,35% de retrabalho representou no mês de julho de 2015 um custo da não qualidade de mais de R\$ 62.000,00. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo reduzir o retrabalho gerado pela ocorrência de defeitos em juntas soldadas em um processo de soldagem FCAW, utilizando-se a metodologia Seis Sigma. Para tanto, utilizou-se o método de estudo de caso com a aplicação das fases do modelo DMAIC propostas na metodologia Seis Sigma. A correta e disciplinada aplicação da metodologia e a adoção das soluções propostas possibilitaram uma redução no retrabalho em juntas soldadas em 76% em relação ao nível inicial e uma economia média mensal no custo da não qualidade de mais de R\$ 58.000,00, demonstrando que a metodologia Seis Sigma foi eficaz e adequada no atingimento dos objetivos deste trabalho de forma ampla e sistêmica.

Palavras-chave: Seis Sigma. Soldagem. Retrabalho. Defeitos.

ABSTRACT

The high degree of tax competition in the market has led the company on a constant and massive search for continuous and dramatic improvements in their processes. Thus, the reduction and/or elimination of the sources of losses that affect the organizations and the search for improvement opportunities constitutes an important mechanism for increased performance and competitive potential. In this scenario, Six Sigma has been adopted as a structured methodology and is highly focused on reducing process variability, improving the quality and organizational success, while combined with the use of statistical thinking and the pursuit of financial results. The company focus of this study had problems with the rework index generated in the welding process, because this was above the tolerances specified in the standards and customer's technical specifications. Rework index in welded joints at the beginning of the project was 5,35% and the tolerance set by the client was at most 2,5% of rework in this process. This rate of 5,35% rework represented in July 2015 presented a cost of poor quality more than R\$ 62.000,00. In this context, this study aimed to reduce rework generated by the occurrence of defects in welded joints in a FCAW welding process, using the Six Sigma methodology. For this, it was used in the case study method to the implementation stage of the DMAIC model proposed in the Six Sigma methodology. The correct and disciplined application of the methodology and the adoption of the proposed solutions have enabled a reduction in rework of soldered joints in 76% compared to the initial level and an average monthly savings in the cost of poor quality of over R\$ 58.000,00, showing that the Six Sigma methodology was effective and appropriate in achieving the objectives of this work in a broad and systemic way.

Key-words: Six Sigma. Welding. Rework. Defects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de distribuição normal centralizada	21
Figura 2 – Processo básico de soldagem FCAW	35
Figura 3 – Concavidade	37
Figura 4 – Deposição insuficiente	37
Figura 5 – Falta de fusão	37
Figura 6 – Falta de penetração	38
Figura 7 – Mordedura	38
Figura 8 – Penetração excessiva	38
Figura 9 – Porosidade	39
Figura 10 – Tipos de trincas	39
Figura 11 – Inclusão de escória	40
Figura 12 – Princípio básico da inspeção por ultrassom	43
Figura 13 – Fluxo Metodológico	44
Figura 14 – Mapa de Raciocínio	49
Figura 15 – SIPOC processo de solda	50
Figura 16 – Estado ideal x estado atual	51
Figura 17 – Desdobramento das métricas do Projeto	56
Figura 18 – Mapa do processo de solda detalhado	61
Figura 19 – Diagrama de Ishikawa: falta de fusão e inclusão de escória	71
Figura 20 – Diagrama de Ishikawa: trinca	73
Figura 21 – Estado ideal x estado atual após implementação das ações de melhoria	84

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Modelo de configuração “3D” da junta a ser soldada	62
Foto 2 – Execução da soldagem	63
Foto 3 – Execução da goivagem no passe de raiz (remoção da solda)	63
Foto 4 – Soldagem finalizada	63
Foto 5 – Execução de limpeza final da junta (a) / inspeção por líquido penetrante – LP (b)	64
Foto 6 – Execução de inspeção visual - EVS.....	64
Foto 7 – Execução de inspeção por partículas magnéticas - PM.....	64
Foto 8 – Execução de inspeção por ultrassom - US	65
Foto 9 – Identificação e marcação do defeito após inspeção por ultrassom - US	65
Foto 10 – Processo de retrabalho: goivagem (remoção da solda para localização do defeito) (a) / inspeção por líquido penetrante - LP (b)	65
Foto 11 – Soldagem do retrabalho finalizada.....	66
Foto 12 – Aprovação da solda após reinspeção por ultrassom - US.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de Pareto: tipo de defeito	52
Gráfico 2 – Gráfico de Pareto: tipo de junta	52
Gráfico 3 – Gráfico de Pareto: posição de soldagem	53
Gráfico 4 – Gráfico de controle para acompanhamento do índice de retrabalho	88
Gráfico 5 – Gráfico de linhas para acompanhamento CNQ	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre nível sigma, defeitos e custos da baixa qualidade	15
Quadro 2 – Meta de desempenho de 99% x Desempenho Seis Sigma.....	23
Quadro 3 – Ferramentas Seis Sigma geralmente utilizadas em cada fase do projeto	28
Quadro 4 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem FCAW.....	35
Quadro 5 – Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom	43
Quadro 6 – Membros do Projeto	48
Quadro 7 – Estimativas dos custos do retrabalho	54
Quadro 8 – Resumos dos custos do retrabalho no mês de julho/2015	54
Quadro 9 – CTQ's	55
Quadro 10 – Métricas do Projeto.....	56
Quadro 11 – Cronograma do Projeto	58
Quadro 12 – Carta de Projeto	59
Quadro 13 – Resumo das atividades e tempos: soldagem junta 01	67
Quadro 14 – Resumo das atividades e tempos: soldagem junta 02	68
Quadro 15 – Dados gerais: avaliadores vs avaliadores	74
Quadro 16 – Concordância entre cada avaliador	75
Quadro 17 – Concordância entre todos os avaliadores	75
Quadro 18 – Dados gerais: avaliadores vs padrão	75
Quadro 19 – Concordância entre o padrão e cada avaliador	76
Quadro 20 – Concordância entre o padrão e todos os avaliadores	76
Quadro 21 – Matriz de Priorização XY	78
Quadro 22 – Resumo Matriz de Priorização XY	79
Quadro 23 – Análise dos 5 Por Quês.....	80
Quadro 24 – Comparativo dos resultados antes e após implementação das ações .	84
Quadro 25 – Resumo do plano de ação 5W2H.....	86
Quadro 26 – Poder do teste para 2 proporções	90
Quadro 27 – Teste de proporção – duas amostras	90

LISTA DE SIGLAS

5W2H	<i>Who, What, Why, Where, When, How, How Much</i> (Quem, O Quê, Por Quê, Onde, Quando, Como, Quanto)
BSC	<i>Balanced Scorecard</i>
CEP	Controle Estatístico do Processo
CNQ	Custo da Não Qualidade
CONTEC	Comissão de Normalização Técnica
Cpk	Índice de Capabilidade Nominal de um Processo
CTQ	<i>Critical to Quality</i> (Característica Crítica da Qualidade)
DBPO	Defeitos por Bilhão de Oportunidades
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyse, Improve, Control</i> (Definição, Medição, Análise, Melhoria, Controle)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Delineamento de Experimentos)
DPMO	Defeitos por Milhão de Oportunidades
EBW	<i>Electron Beam Welding</i> (Soldagem com Feixe de Elétrons)
END	Ensaio Não Destrutivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPS	Especificação do Procedimento de Soldagem
ESW	<i>Eletroslag Welding</i> (Soldagem por Eletroescória)
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i> (Soldagem com Arame Tubular)
FF	Falta de Fusão
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise do Modo e Efeito das Falhas)
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (Soldagem a Arco Gás-Metal)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (Soldagem a Arco Gás Tungstênio)
IE	Inclusão de Escória
JAPT	Junta de Ângulo Penetração Total
JPT	Junta de Penetração Total
JTPT	Junta de Topo Penetração Total
LBW	<i>Laser Beam Welding</i> (Soldagem a Laser)
LIE	Limite Inferior de Especificação

LP	Líquido Penetrante
LSE	Limite Superior de Especificação
MSA	<i>Measurement Systems Analysis</i> (Análise do Sistema de Medição)
OFW	<i>Oxifuel Welding</i> (Soldagem Oxi-Gás)
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> (Soldagem a Plasma)
PGW	<i>Pressure Gas Welding</i> (Soldagem a Gás por Pressão)
PM	Partícula Magnética
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Desdobramento da Função Qualidade)
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> (Soldagem ao Arco Submerso)
SIPOC	<i>Supplier, Input, Process, Out, Customer</i> (Fornecedor, Entrada, Processo, Saída, Cliente)
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (Soldagem com Eletrodos Revestidos)
US	Ultrassom
VOC	<i>Voice of Customer</i> (Voz do Cliente)
VS	Visual de Solda
Xs	Variáveis de Entrada
Ys	Variáveis de Saída
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Definição do Tema ou Problema	15
1.2 Delimitações do Trabalho	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Justificativa	17
1.5 Estrutura do Trabalho	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Seis Sigma: surgimento, abordagem e definições	20
2.1.1 Benefícios do Seis Sigma.....	22
2.1.2 Fatores Críticos de Sucesso da Implementação do Seis Sigma	23
2.1.3 O Modelo DMAIC	26
2.2 Definição de Soldagem	29
2.2.1 Processos de Soldagem.....	29
2.3 Descontinuidades em Juntas Soldadas	35
2.3.1 Ensaios Não Destrutivos para Detecção de Descontinuidades.....	40
3 METODOLOGIA	44
3.1 Método de Pesquisa	44
3.2 Método de Trabalho	44
3.3 Método de Coleta de Dados	45
4 ESTUDO DE CASO	47
4.1 Fase Definição	47
4.1.1 <i>Business Case</i> Inicial	47
4.1.2 Membros do Projeto	47
4.1.3 Mapa de Raciocínio.....	48
4.1.4 Mapa de Processo de Alto Nível – “SIPOC”	49
4.1.5 Determinação do Foco do Projeto.....	50
4.1.6 Custos da Não Qualidade - CNQ	53
4.1.7 Características Críticas da Qualidade - CTQ's.....	54
4.1.8 Definição do Problema	56
4.1.9 Objetivo	56

4.1.10 Métricas.....	56
4.1.11 Dificuldades e Barreiras	57
4.1.12 Importância do Projeto para o Negócio	57
4.1.13 Cronograma	58
4.1.14 Carta de Projeto	58
4.2 Fase Medição.....	60
4.2.1 Mapa de Processo Detalhado	60
4.2.2 Análise do Fluxo de Valor do Processo de Solda.....	62
4.2.3 Diagrama de Ishikawa	69
4.2.4 Análise do Sistema de Medição – MSA.....	74
4.2.5 Capacidade e Nível Sigma Inicial do Processo	76
4.3 Fase Análise	77
4.3.1 Matriz de Priorização XY	77
4.3.2 Análise dos 5 Por Quês.....	79
4.4 Fase Melhoria	81
4.5 Fase Controle	87
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

A crescente globalização econômica e o conseqüente aumento da competitividade entre as organizações e das exigências por parte dos Clientes, tem exigido cada vez mais das empresas a capacidade de inovação e aprimoramento de seus produtos e processos a fim de torná-los mais enxutos, lucrativos e atrativos aos Clientes.

Em resposta às necessidades impostas por este cenário altamente competitivo, destaca-se a metodologia Seis Sigma, que ganhou notoriedade no meio gerencial e o seu conceito vem crescendo, devido às aplicações bem-sucedidas e aos resultados gerados em empresas como General Eletric e Motorola. Tais aplicações transformaram o Seis Sigma em uma das poucas iniciativas de orientação técnica a despertar interesse da comunidade financeira e da liderança de grandes organizações, sendo considerada a metodologia da qualidade do século XXI. (WERKEMA, 2004).

Parte da popularidade do Seis Sigma se deve ao fato de que o foco da metodologia está centrado na redução da variação da produção ou dos processos, através da eliminação de defeitos e erros (HARRY; SCHROEDER, 2000) e ao seu caráter estratégico de alcance de metas, estabilidade operacional e obtenção de novos clientes. (WERKEMA, 2004).

Na visão de Brue (2006), o Seis Sigma é uma metodologia de resolução de problemas que busca a redução de custos e o aumento da satisfação do cliente, ao promover a redução de desperdício em todos os processos envolvidos na criação ou entrega de produtos e serviços. Mais especificamente, o Seis Sigma é uma metodologia de resolução de problemas que utiliza dados, medidas e técnicas estatísticas para identificar quais os fatores vitais que reduzirão, de forma drástica, o desperdício e os defeitos, enquanto faz aumentar a previsão de resultados, a satisfação dos clientes, o lucro e o valor para os acionistas.

Alguns benefícios comprovados da implementação da metodologia Seis Sigma são: redução de custos, melhoria da produtividade, crescimento da fatia de mercado, retenção de clientes, redução do tempo de ciclo, redução de defeitos, mudança cultural, desenvolvimento de produtos e serviços, entre outros. Os ganhos e economias obtidos fizeram a General Eletric alcançar a marca de US\$ 750 milhões ao final de 1998 e US\$ 1,5 bilhão ao final de 1999. Da mesma forma, Motorola, entre os

anos de 1987 e 1997 obteve um crescimento de cinco vezes em vendas, com lucros aumentando em torno de 20% ao ano e economia acumulada decorrente dos esforços Seis Sigma na ordem de US\$ 14 bilhões. A Allied Signal (Honeywell) viu sua produtividade aumentar em 6% em 1998 e a margem de lucro em 13%. (PANDE et al., 2001).

Harry e Schroeder (2000) enfatizam que as empresas que implementam o Seis Sigma, associam vantagem competitiva com a redução dos custos da baixa qualidade, que é possível em razão do aumento da qualidade decorrente da diminuição do número de defeitos ou falhas em produtos ou serviços. Um comparativo entre a relação do nível sigma, defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) e custos da baixa qualidade pode ser visualizado no quadro 1.

Quadro 1 – Relação entre nível sigma, defeitos e custos da baixa qualidade

Nível Sigma	DPMO	Custos da Baixa Qualidade
2	308.537 (empresas não competitivas)	Não se aplica
3	66.807	25 a 40% das vendas
4	6.210 (média da indústria)	15 a 25% das vendas
5	233	5 a 15% das vendas
6	3,4 (empresas "classe mundial")	<1% das vendas

Fonte: Harry e Schroeder (2000).

Desta forma, o desafio gerencial para as empresas que desejam inovar, melhorar seus processos, reduzir custos e acima de tudo, manterem-se ativas no seu mercado de atuação, reside na identificação e adoção das práticas de gestão que mais se alinhem às suas estratégias de negócio e que melhor promovam o progresso necessário ao desempenho organizacional sustentável.

1.1 Definição do Tema ou Problema

Neste contexto de análise e resolução de problemas, de alcance de metas e da promoção da melhoria, desenvolve-se o tema central deste trabalho, que trata da aplicação da metodologia Seis Sigma para a redução de retrabalho em juntas soldadas em um processo de soldagem FCAW.

O índice de retrabalho é uma métrica crítica do processo de soldagem e um indicador da qualidade avaliado pelo Cliente. O controle (cálculo) dessa métrica se dá

pelo volume (em milímetros) de juntas soldadas versus a extensão do defeito detectados após a inspeção das soldas.

Esses dados são compilados quinzenalmente e a partir dessas informações é gerado o Controle de Desempenho de Soldadores, o qual irá apresentar o índice de retrabalho por soldador e o geral por projeto. A tolerância para este índice indicada nas normas e especificações técnica do Cliente é de até 2,5% de comprimentos defeituosos de solda no desenvolvimento de perímetro soldado.

Em medição realizada durante o mês de julho de 2015 constatou-se que o índice de retrabalho foi de 5,35%. Para a composição deste índice inspecionou-se através de ensaio não destrutivo por ultrassom 1.093,917mm de solda (5599 juntas soldadas) e a extensão total de defeitos encontrada foi de 58.500mm (390 juntas soldadas).

Desta forma, se estabelece a seguinte situação problemática: “o índice de retrabalho em juntas soldadas detectado pelo método de ultrassom para juntas de penetração total em julho de 2015 foi de 5,35%, uma diferença de 53,27% acima da tolerância máxima de 2,5% definida nas normas e especificações técnicas do Cliente”.

1.2 Delimitações do Trabalho

Este trabalho limita-se à aplicação da metodologia Seis Sigma, através de um estudo de caso realizado no processo de soldagem em uma empresa de médio porte do Sul do Brasil, objetivando a redução do retrabalho em juntas soldadas.

O estudo do retrabalho ocorreu no processo de soldagem FCAW (soldagem com arame tubular). Os tipos de defeitos em juntas soldadas considerados para efeito deste estudo foram inclusão de escória, falta de fusão e trinca. O método de ensaio não destrutivo utilizado para a detecção dos defeitos e composição dos índices de retrabalho foi o método do ultrassom e a configuração da junta foi JPT (junta de penetração total).

Outros processos de soldagem, tipos de defeitos e métodos de ensaios não destrutivos que não os especificados no parágrafo acima não fizeram parte deste estudo, porém, foram abordados na revisão bibliográfica de forma sucinta para um maior esclarecimento e entendimento do estudo de caso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Implantar a metodologia Seis Sigma para a redução de retrabalho em juntas soldadas em um processo de soldagem FCAW em uma empresa atuante no ramo de fabricação e montagem de estruturas metálicas no Sul do Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) identificar e quantificar as perdas existentes no processo de soldagem, em especial aquelas relacionadas ao retrabalho em juntas soldadas;
- b) seguir as fases do modelo DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar);
- c) propor soluções de melhoria para a redução de retrabalho em juntas soldadas;
- d) analisar os resultados obtidos após a implementação da metodologia Seis Sigma.

1.4 Justificativa

A principal justificativa para o desenvolvimento deste trabalho se dá sob a ótica empresarial, onde a busca por resultados mais competitivos, impulsionados pela concorrência globalizada da economia, estimula as empresas a encontrarem métodos que auxiliem a redução das perdas e que melhorem a gestão de seus processos. Práticas e ferramentas da qualidade, como os 5S, a Qualidade Total, Reengenharia, entre outras, já foram utilizadas e aprimoradas objetivando a redução da variabilidade e a melhoria contínua nos processos. (SOUZA, 2013).

O programa Seis Sigma está se consolidando como uma forma de promoção da melhoria do desempenho do negócio da empresa, do aumento da competitividade e como forma de incentivo às ações estratégicas e gerenciais que priorizem a melhoria contínua de produtos e serviços, incrementem a capacidade de inovação e reduzam custos. (SANTOS; MARTINS, 2003).

Para Eckes (2001), o programa Seis Sigma deve estar diretamente relacionado com a estratégia da empresa, ou seja, com os planos para o alcance das metas e resultados desejados pela organização. Por este motivo, o Seis Sigma é de responsabilidade da alta administração da empresa, uma vez que é ela que define as estratégias e a forma como o Seis Sigma será implementado na empresa. Coronado (2002) salienta que a ligação da metodologia Seis Sigma com a estratégia do negócio é um dos principais fatores críticos de sucesso para a implementação da metodologia.

Partindo deste pressuposto, buscou-se alinhar as práticas e objetivos da implementação da metodologia Seis Sigma com as estratégias do negócio da empresa foco deste estudo. O objetivo principal deste projeto está em acordo com as estratégias da empresa definidas pela Direção através do Mapa Estratégico, onde a redução do retrabalho e conseqüente redução dos custos associados, bem como melhoria geral do processo de solda, poderão contribuir diretamente para 07 das 15 estratégias inseridas no Mapa. As estratégias que poderão ter seu rendimento maximizado devido atingimento do objetivo deste projeto são: aumento da receita; expansão da produtividade e lucratividade; aumento do valor agregado do segmento de Óleo e Gás; qualificação da relação e geração de valor para o cliente; otimização dos métodos e processos construtivos; fortalecimento da cultura de melhoria contínua e por fim; atração, captação, retenção e desenvolvimento das melhores pessoas.

Cabe enfatizar ainda, a questão dos custos da qualidade. O custo da qualidade de um produto é um dos principais fatores que podem inviabilizar a produção e fornecimento do mesmo. Logo, com o objetivo de viabilizar o fornecimento e manter-se ativa em um período de crise econômica e de recessão no seu principal segmento de atuação, Óleo e Gás, a redução dos custos envolvidos no processo torna-se ainda mais necessária e fundamental. Os números levantados durante medição realizada em julho de 2015, demonstram que o processo de soldagem não atende às especificações do Cliente quanto ao índice de retrabalho. Um índice de 5,35% de retrabalho representou um custo da não qualidade de R\$ 62.653,50.

Por estas razões, justifica-se a adoção da metodologia Seis Sigma para a redução do retrabalho no processo de soldagem, bem como para a manutenção e sobrevivência da empresa.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos conforme descrição a baixo:

- Capítulo 1: neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais, o tema abordado, delimitações do trabalho, delineamento dos objetivos gerais e específicos a serem alcançados e a justificativa para a realização deste trabalho.
- Capítulo 2: consiste na revisão bibliográfica sobre os temas Seis Sigma (benefícios, fatores críticos de sucesso e o modelo DMAIC); definição e processos de soldagem; descontinuidades em juntas soldadas e ensaios não destrutivos para sua detecção.
- Capítulo 3: demonstra o método de pesquisa adotado, bem como método de trabalho e de coleta de dados.
- Capítulo 4: apresenta o estudo de caso da aplicação da metodologia Seis Sigma em um processo de soldagem em uma empresa de médio porte do Sul do Brasil.
- Capítulo 5: neste capítulo são abordadas as conclusões e considerações finais resultantes da aplicação da metodologia Seis Sigma.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Seis Sigma: surgimento, abordagem e definições

O Seis Sigma surgiu na Motorola em 1987 com o objetivo de tornar a empresa capaz de enfrentar a concorrência, que fabricava produtos com qualidade superior e preços menores. O foco do programa estava centrado no aumento da satisfação dos clientes e redução ou eliminação dos defeitos nos produtos. Após a Motorola receber o prêmio Nacional da Qualidade Malcolm Baldrige em 1988, o Seis Sigma tornou-se conhecido como o programa responsável pelo sucesso da organização. (WERKEMA, 2012; PYZDEK; KELLER, 2011; PEREZ-WILSON, 1999).

Seguindo os passos da Motorola, Asea Brown Boveri, AlliedSignal (Honeywell), General Electric (GE), Kodac e Sony passaram a adotar o programa e a divulgação dos ganhos obtidos por estas empresas geraram crescente interesse pelo Seis Sigma.

Apesar de a Motorola ser a precursora do Seis Sigma, o programa ganhou popularidade em 1994, quando o presidente da GE (General Electric) considerou-a o caminho para a busca da qualidade superior e da rentabilidade. (WELCH, 2001).

Satolo et al. (2009), explicam que são vários os termos utilizados para fazer referência ao Seis Sigma, tanto pela literatura, quanto por parte das organizações que o adotam, sendo os termos mais comuns associados ao Seis Sigma: a prática, iniciativa, metodologia, técnica, programa, estratégia, entre outros. Para Pande et al. (2001), dentre as várias definições para o termo Seis Sigma, este pode ser abordado como uma estratégia que contempla definições de medição, meta e mudança organizacional, buscando benefícios que incluem a redução de custos, incremento da produtividade, crescimento de mercado, mudança cultural, entre outros, de forma que as organizações não apenas alcancem o sucesso, mas sejam capazes de mantê-lo.

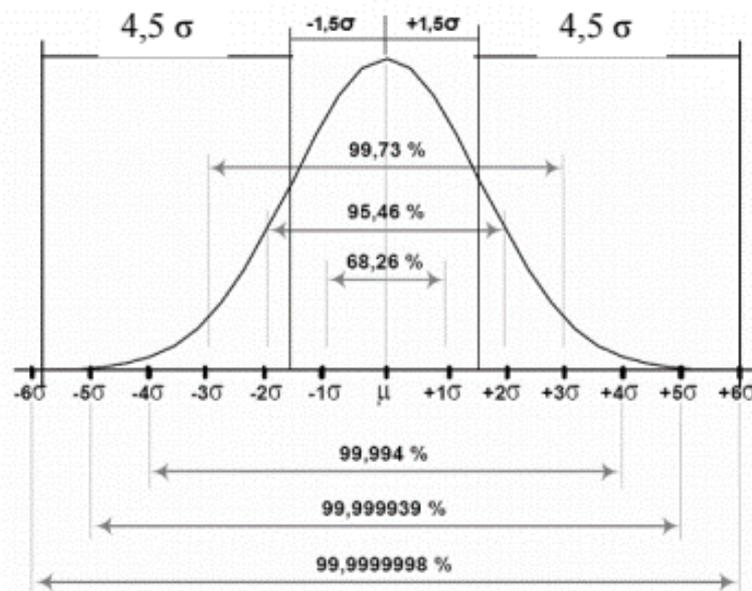
Do ponto de vista gerencial, Seis Sigma é uma estratégia de mudanças e implementação rigorosa, focada e altamente eficiente das técnicas e princípios da qualidade utilizados para acelerar o aprimoramento em processos, produtos, serviços e para o aumento da satisfação de clientes. (ROTONDARO, 2011; PYZDEK; KELLER, 2011; WERKEMA, 2012).

É um nível otimizado de desempenho dos negócios que se aproxima a zero defeito. (PEREZ-WILSON, 1999; PYZDEK; KELLER, 2011). Ainda, conforme

Rotondaro (2011), significa redução da variação no resultado entregue ao cliente numa taxa de 3,4 falhas por milhão de oportunidades ou 99,99966% de perfeição.

Do ponto de vista estatístico, a letra sigma “ σ ” no alfabeto grego é um símbolo utilizado na notação estatística para representar o desvio-padrão de uma população. Desvio-padrão é um indicador da quantidade de variação. (PANDE et al., 2001; PYZDEK; KELLER, 2011; PEREZ-WILSON, 1999). Ainda, segundo Klefsjo et al. (2001), significa que em uma distribuição normal centralizada, podem ser encontrados seis desvios padrões entre a média e o limite inferior de especificação (LIE) e mais seis desvios padrões entre a média e o limite superior de especificação (LSE), resultando em 1,2 defeitos por bilhão de oportunidades (DPBO). A Figura 1 mostra o gráfico desse tipo de distribuição normal centralizada e os níveis Sigma entre a média e os limites de especificação, a qual pode ser referente à dimensão de uma peça mecânica, por exemplo.

Figura 1 – Gráfico de distribuição normal centralizada



Fonte: Tennant (2002).

Marshall et al. (2004) resumem que o programa Seis Sigma significa reduzir o número de defeitos e falhas, a variabilidade dos processos, a diminuição do tempo de ciclo, o aperfeiçoamento dos estoques, a redução de custos, a satisfação dos clientes, o aumento da qualidade e lucratividade, resultando em importantes ganhos financeiros para a organização.

2.1.1 Benefícios do Seis Sigma

Para Pande et al. (2001) os principais benefícios da adoção do Programa Seis Sigma são:

- **Gera sucesso sustentado:** o Seis Sigma cria as habilidades e cultura para inovação e melhoria constante.
- **Determina uma meta de desempenho para todos:** o Seis Sigma usa uma base comum de negócios (o processo e o cliente) para criar uma meta consistente: o desempenho Seis Sigma ou um nível de desempenho próximo do perfeito. Qualquer empresa que compreenda as necessidades de seus clientes pode avaliar seu desempenho em relação à meta Seis Sigma de 99,9997% “perfeito”, um padrão tão alto que faz com que a visão da maioria das empresas daquilo que é um desempenho “excelente” parecer fraco.
- **Intensifica o valor para os clientes:** o foco no cliente existente no Seis Sigma objetiva aprender o que significa valor para os clientes (e futuros prováveis clientes) e planejar como oferecer isto a eles de forma lucrativa.
- **Acelera a taxa de melhoria:** o Seis Sigma ajuda a empresa a não somente melhorar seu desempenho, mas também a desenvolver a cultura para a melhoria.
- **Promove aprendizagem:** o Seis Sigma é um método que pode aumentar e acelerar o desenvolvimento e o compartilhamento de novas ideias por toda a organização, promovendo a aprendizagem organizacional.
- **Executa mudanças estratégicas:** uma compreensão mais profunda dos processos e procedimentos internos possibilitarão uma maior capacidade para implementação tanto de pequenos ajustes, quanto das mudanças maiores que o sucesso nos negócios no cenário atual irão demandar.
- **Promove gerenciamento dirigido para dados e fatos:** o Seis Sigma leva o conceito de gerenciamento baseado em fatos a um novo e poderoso nível. O Seis Sigma começa esclarecendo que medidas são fundamentais para avaliar o desempenho do negócio, depois aplicam-se dados e análises de modo a construir um entendimento de variáveis-chave com foco na otimização dos resultados. Em um nível mais realista, o Seis Sigma ajuda os gerentes a responderem duas perguntas essenciais para apoiar decisões e soluções dirigidas por fatos: de que dados e/ou

informações a empresa realmente precisa? e, como usar estes dados/informações para o máximo benefício?

Pande et al. (2001) exemplificam ainda, o benefício do Seis Sigma fazendo um contraste entre o número de problemas que seriam encontrados com um objetivo de 99% de qualidade versus o desempenho Seis Sigma, conforme quadro abaixo:

Quadro 2 – Meta de desempenho de 99% x Desempenho Seis Sigma

META DE DESEMPENHO 99%	META DE DESEMPENHO SEIS SIGMA 99,9997%
Para cada 300.000 cartas entregues:	
3.000 entregas erradas	1 entrega errada
De cada 500.000 cliques em “reiniciar” em computadores:	
4.100 falhas	Menos de 2 falhas
Para 500 anos de fechamento de balanços do mês:	
60 meses não estariam em balanço	0,18 mês não estaria em balanço
De cada semana de transmissão de TV (por canal):	
1,68 hora de problemas de transmissão	1,8 segundo de problemas de transmissão

Fonte: Pande et al. (2001).

2.1.2 Fatores Críticos de Sucesso da Implementação do Seis Sigma

Os fatores críticos de sucesso no contexto da implementação de projetos Seis Sigma representam os elementos essenciais, sem os quais os projetos não terão chance de êxito. A negligência em algum destes fatores determinará a diferença entre a implementação com sucesso ou o seu fracasso. Abaixo estão descritos os 12 principais fatores críticos de sucesso para a implementação da metodologia Seis Sigma, segundo Coronado (2002):

- **Envolvimento e Comprometimento da Alta Gerência:** todas as empresas que adotaram a metodologia Seis Sigma concordam que dentre os fatores críticos de sucesso, o mais importante é o contínuo apoio e entusiasmo da alta gerência. O Seis Sigma deve ser parte da função e da rotina diária de cada líder, tanto do nível estratégico quanto operacional. Os líderes de alto escalão devem dar o exemplo e medir o desempenho de seus subordinados através dos indicadores de sucesso do Seis Sigma.
- **Mudança Cultural:** a metodologia Seis Sigma é considerada uma estratégia de ruptura ou quebra de paradigma porque envolve ajustes nos valores e cultura da

organização para sua adequada implementação. Para eliminar esta barreira (de resistência à mudança), os líderes têm que conduzir a implementação demonstrando, através do seu exemplo, que defeitos e falhas não devem ser escondidos por medo de punição, mas sim, são oportunidades para desenvolvimento e melhoria, além da elevação técnica dos participantes. Coronado (2002) descreve as 4 razões para resistência das pessoas envolvidas nesta mudança: **Técnica**: dificuldade de entender as ferramentas estatísticas. Treinamento é fundamental, com exemplos do dia-a-dia para facilitar. **Política**: crença que a implementação da solução causará mais perdas de material. A estratégia para reverter esta situação é a demonstração da necessidade da melhoria e os resultados positivos de sua implementação. **Individual**: resultado de colaboradores estressados com excesso de trabalho. Deve-se demonstrar o quanto o programa auxiliará na execução de tarefas repetitivas, o que resultará em tempo para participar de projetos de melhoria no futuro. **Organizacional**: esta é a barreira mais difícil de ser removida porque a cultura de toda a organização foi formada pelo discurso dos seus líderes. Neste caso, uma intensa e bem estruturada comunicação dos benefícios da mudança deve ser passada pelos próprios líderes.

- **Comunicação**: um plano de comunicação é importante para envolver as pessoas na iniciativa Seis Sigma, esclarecendo como funciona, como interferirá na rotina de trabalho e principalmente, os benefícios de sua implementação, usando-se como exemplo a publicação de projetos e seus resultados, principalmente se evidenciam as lições aprendidas.

- **Infraestrutura da organização**: para o sucesso da implantação da metodologia Seis Sigma, algumas características organizacionais são necessárias. Algumas delas são: transparência na comunicação, estratégia de longo prazo e principalmente trabalho em equipe, além de suficiente investimento e recursos para apoiar a implantação. O trabalho em equipe é muito importante por causa do senso de propriedade de processo de seus membros, da comunicação fácil e da visão geral da organização.

- **Treinamento**: é um fator crítico muito importante. Quanto antes iniciar as sessões de treinamento e comunicação do porquê e do como da implementação do Seis Sigma, melhor. Esta atitude diminuirá a ansiedade dos envolvidos e sessões intensivas de treinamento, tanto para *green belt* e/ou *black belt*, serão a fonte do conhecimento teórico que embasará toda a aplicação das ferramentas estatísticas a serem empregadas. Normalmente as sessões de treinamento se iniciam com a alta gerência executando o treinamento de *champion* e em seguida se iniciam as sessões

de treinamento dos *belts*. Os *belts* são os agentes da mudança e devem disseminar a filosofia Seis Sigma por todas as áreas. Os colaboradores que executam as atividades e que conhecem os detalhes de cada processo devem estar familiarizados aos conceitos do Seis Sigma, uma vez que são os principais contribuidores para a consistência da qualidade dos produtos ou serviços.

- **Ligação da metodologia Seis Sigma com a estratégia do negócio:** o Seis Sigma não pode ser tratado como mais uma outra atividade paralela. É necessária aderência total ao programa e não apenas ao uso de algumas ferramentas isoladas. Os projetos devem estar diretamente relacionados a melhoria em produtos e processos que impactarão significativamente nos objetivos e estratégias de negócio da organização, e também que afetarão positivamente os negócios dos clientes.

- **Ligação do Seis Sigma com o cliente:** o Seis Sigma deve iniciar e terminar com o cliente. Projetos devem iniciar com a determinação dos requisitos dos clientes, sendo de extrema importância a identificação das características críticas de qualidade para os clientes, também conhecida como CTQs (*Critical to Quality*). Antes do início de qualquer projeto Seis Sigma, estas características devem ser determinadas quantitativamente, podendo tornarem-se métricas primárias ou contramedidas do projeto.

- **Ligação do Seis Sigma com Recursos Humanos:** a área de RH da organização deve ser envolvida para facilitar a correta preparação das pessoas para as mudanças de comportamento que serão necessárias para que os objetivos do Seis Sigma sejam internalizados no nível individual.

- **Ligação do Seis Sigma com os fornecedores:** as organizações precisam expandir a filosofia Seis Sigma além de suas fronteiras. Uma maneira de expandir a metodologia é envolvendo fornecedores chave, tornando-os parceiros e dividindo os ganhos atingidos pelos projetos em conjunto. O resultado é duplicado em uma relação ganha-ganha, pois fideliza a relação e se reduz a variabilidade dos insumos, comparado com materiais com fontes múltiplas de fornecimento.

- **Entender as ferramentas e técnicas inseridas na metodologia Seis Sigma:** durante o treinamento, os *belts* aprendem 3 conjuntos de ferramentas: liderança, processo e time. Como a abordagem da implementação Seis Sigma pode variar de organização para organização, os *belts* têm que ser hábeis na condução do projeto para se chegar ao resultado esperado. A abordagem mais comum é a metodologia de resolução de problemas DMAIC. Qualquer que seja a abordagem, a utilização de

ferramentas estatísticas é fortemente recomendada. Entretanto, em muitos casos, ferramentas estatísticas avançadas não são necessárias. É muito importante o acompanhamento e suporte técnico de *belts* experientes na utilização e indicação das ferramentas.

- **Habilidades de Gerenciamento de Projetos:** os líderes, podendo ser *green* ou *black belts*, devem possuir conhecimentos práticos em gerenciamento de projetos. Muitos projetos falham devido à fraca habilidade do líder no gerenciamento do projeto, na determinação de agenda de atividades, regras da equipe e das reuniões, e principalmente na determinação de papéis e responsabilidades dos membros da equipe. Tempo, custo e qualidade são elementos chave do gerenciamento de projetos.
- **Seleção e priorização de projetos:** como o Seis Sigma é uma metodologia direcionada pela execução de projetos, é essencial selecionar os projetos que proverão o máximo benefício para a organização. Os projetos são escolhidos conforme eles impactam positivamente os objetivos de negócio da organização.

2.1.3 O Modelo DMAIC

A metodologia Seis Sigma segue um rigoroso modelo, DMAIC, que fornece uma sequência ordenada, lógica e eficaz no gerenciamento dos projetos. O DMAIC é um modelo formado por cinco fases que possuem o objetivo de guiar as atividades necessárias para a implementação de projetos Seis Sigma. (SANTOS; MARTINS, 2003).

Chowdhury (2001) descreve cada uma das fases que devem ser seguidas por um projeto que utiliza o modelo DMAIC com a indicação de algumas ferramentas recomendadas para cada etapa:

- **Definição:** primeiramente os dados preliminares do projeto devem ser estabelecidos: a missão, o escopo, as métricas, o time, o tempo e o impacto financeiro estimados. Ou seja, definir o projeto, os marcos iniciais e finais, os membros da equipe com suas respectivas responsabilidades, as métricas que indicarão se o projeto teve sucesso ou não e qual a estimativa de retorno que a empresa terá com a execução deste projeto.
- **Medição:** a etapa de Medição objetiva determinar a situação atual do processo no momento do início do projeto. Deve ser mapeado o processo identificando-se todas

as variáveis de entrada e saída. É realizada a primeira priorização das variáveis de entrada utilizando a ferramenta Matriz de Priorização ou o Gráfico de Pareto. A verificação do sistema de medição também é realizada para garantir que os resultados sejam confiáveis. Ainda nesta etapa, coleta-se o maior número de dados para que seja estabelecida a capacidade inicial do processo ou a linha de base, utilizando-se gráficos de controle.

- **Análise:** após a Medição, vem a fase da Análise, onde continua-se a priorização das variáveis de entrada através do entendimento das relações entre as causas e os efeitos do processo e potenciais fontes de variabilidade. Normalmente neste passo se utiliza a ferramenta Análise do Modo e Efeito das Falhas (FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*). Quando se dispõe de dados históricos do processo, pode-se utilizar também a ferramenta Análise Múltipla da Variância para se priorizar ainda mais as variáveis e focar em apenas algumas variáveis os experimentos para a coleta de informação ativa. Algumas ideias de melhoria de rápida e fácil implantação, geralmente chamadas de *Quick Hits*, são também saídas deste passo.

- **Implementação:** na etapa 4, Implementação da Melhoria, são priorizadas as ações a serem implementadas com os prazos e responsáveis. Também neste passo, continua-se a entender ainda mais o efeito das variáveis-chave de entrada nas variáveis de saída do processo. Este estudo final é normalmente auxiliado pela ferramenta de Delineamento de Experimentos (DOE - *Design of Experiments*), onde antes de se iniciar qualquer processo de melhoria por tentativa e erro, faz-se um detalhado planejamento a fim de se otimizar a quantidade de experimentos (que envolve custo). Neste planejamento são determinados quais os limites inferiores e superiores que serão aferidos às variáveis de entrada, com objetivo de determinar a amplitude do impacto nas variáveis-resposta do processo. Portanto, após a realização dos experimentos, define-se quais os valores otimizados das variáveis de entrada resultarão nas melhores variáveis de saídas.

- **Controle:** finalmente, com as poucas variáveis de entrada críticas para o processo determinadas, bem como seus valores otimizados para se obter os valores desejados das variáveis de saída, um plano de controle deve ser estabelecido para que o processo seja previsível e consistente e, desta forma, para que os ganhos conquistados pelo projeto sejam mantidos. O plano de controle é um documento formal (normalmente uma planilha) que estabelece e monitora a capacidade final do processo no longo prazo.

Pyzdek e Keller (2011) apresentam de forma prática a relação existente entre as etapas do método DMAIC e algumas técnicas e ferramentas recomendadas em cada fase do Projeto Seis Sigma, conforme quadro abaixo.

Quadro 3 – Ferramentas Seis Sigma geralmente utilizadas em cada fase do projeto

Fase do Projeto	Ferramentas Seis Sigma
DEFINIR	<ul style="list-style-type: none"> • Termo de Abertura • Ferramentas VOC (enquetes, dinâmicas de grupo, cartões de comentários) • Mapeamento do Processo • QFD • SIPOC • <i>Benchmarking</i> • Ferramentas de gerenciamento e planejamento de projetos • Análise de Pareto
MEDIR	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de sistemas de medição • Gráfico de comportamento de processo (CEP) • Análise exploratória de dados • Estatística descritiva • Mineração de dados (ou <i>data mining</i>) • Gráfico de execução • Análise de Pareto
ANALISAR	<ul style="list-style-type: none"> • Diagramas de causa e efeito • Diagrama em árvore • <i>Brainstorming</i> • Gráficos de comportamento de processo (CEP) • Mapeamento do Processo • Projeto de experimentos • Estatística enumerativa (teste de hipótese) • Estatística inferencial (Xs e Ys) • Simulação
MELHORAR	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama de análise do campo de força • FMEA • Ferramentas 7M • Ferramentas de gerenciamento e planejamento de projetos • Estudos pilotos e protótipos • Simulações
CONTROLAR	<ul style="list-style-type: none"> • CEP • FMEA • ISO 900x • Alterar orçamentos, modelos de propostas e de estimativa de custo • Sistema de envio de informação

Fonte: Pyzdek e Keller (2011).

Os próximos tópicos a serem abordados neste referencial teórico (definição e processos de soldagem, bem como discontinuidades em juntas soldadas e ensaios

não destrutivos para sua detecção), tem por objetivo fornecer alguns conceitos importantes que serão abordados e discutidos ao longo do estudo de caso.

2.2 Definição de Soldagem

Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. (MODENESI; MARQUES, 2011, p. 1).

De acordo com a American Welding Society (AWS) (2010), a definição de soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição. Logo, o resultado desta operação é o que se chama de solda.

Existem basicamente três grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro se baseia no uso de calor, aquecimento e fusão parcial das partes a serem unidas, e é denominado processo de soldagem por fusão. O segundo se baseia na deformação localizada das partes a serem unidas, que pode ser auxiliada pelo aquecimento dessas até uma temperatura inferior à temperatura de fusão, conhecido como processo de soldagem por pressão ou processo de soldagem no estado sólido. E o terceiro se baseia no processo por brasagem, que liga metais pelo aquecimento adequado e pelo uso de um metal de adição com temperatura de fusão mais baixa do que a temperatura sólida do metal de base. O metal de adição preenche a junta por capilaridade. Neste tipo de união, o metal de base nunca se funde e é este fato que diferencia a brasagem de outros processos de soldagem por fusão. (AWS, 2010).

2.2.1 Processos de Soldagem

Para o diagnóstico e entendimento dos problemas que geralmente ocorrem durante a soldagem, deve-se conhecer os princípios básicos de execução e equipamentos utilizados. De acordo com Marques (2006), os processos mais utilizados são:

- Soldagem com Eletrodos Revestidos - SMAW;
- Soldagem a Arco Gás-Metal - GMAW.
- Soldagem a Arco Gás Tungstênio - GTAW;

- Soldagem ao Arco Submerso - SAW;
 - Soldagem a Plasma - PAW;
 - Soldagem por Eletroescória - ESW;
 - Soldagem Oxi-Gás - OFW;
 - Soldagem com Feixe de Elétrons - EBW;
 - Soldagem a Laser – LBW; e
 - Soldagem com Arame Tubular – FCAW (trata-se do processo de soldagem utilizado pela empresa onde foi realizado o estudo de caso).
- **Soldagem com Eletrodos Revestidos (*Shielded Metal Arc Welding- SMAW*):** é um processo no qual a coalescência (união) dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça. O eletrodo é formado por um núcleo metálico (alma), recoberto por uma camada de minerais e/ou outros materiais (revestimento). A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas. O equipamento usual consiste de fonte de energia (ou máquina de soldagem), porta-eletrodo e cabos, além de equipamentos de segurança para o soldador (máscara, luvas, avental, etc.) e para a limpeza do cordão e remoção de escória (picadeira e escova de aço). Para a soldagem, a parte não revestida do eletrodo é fixada no porta eletrodo e o arco é iniciado tocando-se rapidamente a ponta do eletrodo na peça (que estão conectados, por cabos, aos terminais da máquina de soldagem). O calor do arco funde a ponta do eletrodo e um pequeno volume do metal de base formando a poça de fusão. A soldagem é realizada manualmente, com o soldador controlando o comprimento do arco e a poça de fusão (pela manipulação do eletrodo) e deslocando o eletrodo ao longo da junta. Quando o eletrodo é quase todo consumido, o processo é interrompido para troca do eletrodo e remoção de escória da região onde a soldagem será continuada.
- **Soldagem a Arco Gás Metal (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*):** é um processo de soldagem a arco que produz a coalescência dos metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça. A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases.

Se este gás é inerte, o processo é também chamado de MIG (*Metal Inert Gas*). Se o gás for ativo, o processo é chamado de MAG (*Metal Active Gas*). O processo é normalmente operado de forma semiautomática e apresenta elevada produtividade. A transferência de metal através do arco se dá, basicamente, por três mecanismos: aerossol (*spray*), globular e curto-circuito, dependendo de parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, composição do gás de proteção e comprimento do eletrodo. O equipamento básico para este processo consiste de tocha de soldagem, fonte de energia de corrente constante, fonte de gás e alimentador de arame.

- **Soldagem a Arco Gás Tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding - GTAW*):** ou como é mais conhecida no Brasil, TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo no qual a união dos metais é obtida pelo aquecimento destes por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes. A soldagem GTAW pode ser manual ou mecanizada. O processo GTAW é considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco e as suas principais variáveis são: corrente de soldagem, composição, diâmetro e forma do eletrodo, composição do gás de proteção e metal de adição. O equipamento básico do processo consiste de fonte de energia, tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção e um sistema para a abertura do arco.

- **Soldagem a Arco Submerso (*Submerged Arc Welding - SAW*):** é um processo no qual a coalescência dos metais é produzida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e a peça. O arco é protegido por uma camada de material fusível granulado (fluxo) que é colocada sobre a peça enquanto o eletrodo é alimentado continuamente. O fluxo na região próxima ao arco é fundido, protegendo o arco e a poça de fusão e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão. O fluxo fundido ajuda a estabilizar o arco e desempenha uma função purificadora sobre o metal fundido. Como o arco ocorre sob a camada de fluxo, ele não é visível, daí o nome do processo. Este processo é muito usado na soldagem de estruturas de aço, na fabricação de tubulações e na deposição de camadas de revestimento tanto na fabricação como na recuperação de peças desgastadas. O equipamento necessário para o processo consiste normalmente de fonte de energia, alimentador de arame, painel de controle, tocha de soldagem, porta fluxo e sistema de deslocamento da tocha.

- **Soldagem a Plasma (*Plasma Arc Welding - PAW*):** é um processo que utiliza o arco operando em condições especiais, que atua como uma fonte extremamente estável de calor, permitindo a soldagem da maioria dos metais com espessuras de 0,02 a 6 mm ou mais. Esta fonte especial de calor garante maior concentração de energia, maior estabilidade e maior capacidade de penetração do que os processos GTAW, SMAW e GMAW. Esse processo é baseado no processo GTAW, apresentando, como diferença fundamental, a utilização de um bocal extra (bocal constritor) que causa a concentração (constricção) do arco elétrico. O gás de plasma (geralmente argônio) é alimentado com uma pequena vazão entre o eletrodo e o bocal constritor saindo pelo orifício deste para formar a chama de plasma. A proteção do plasma e da poça de fusão é feita por um gás (normalmente argônio ou hélio) fornecido pelo bocal externo. O arco de soldagem é iniciado com o auxílio de um arco piloto de baixa corrente mantido entre o eletrodo e o bocal. A soldagem a plasma é aplicável a maioria dos metais e a muitos materiais não metálicos. Entretanto, seu custo relativamente elevado e a maior complexidade do processo (em comparação com GTAW) limitam o seu uso principalmente para aplicações críticas em indústrias de alta tecnologia (indústria aeronáutica e aeroespacial, por exemplo) para as quais a utilização do processo é justificável.
- **Soldagem por Eletroescória (*Eletroslag Welding - ESW*):** é um processo de soldagem por fusão que utiliza a passagem de uma corrente elétrica através de uma escória condutora fundida para gerar o calor necessário à fusão localizada da junta e do metal de adição. Esta escória também protege a poça de fusão e o metal de adição da contaminação pelo ambiente. O processo é usado primariamente para a união de duas ou mais peças (em geral, de grande espessura) em um único passe com a soldagem sendo feita na posição vertical ascendente. O metal e a escória fundidos são mantidos em posição com o auxílio de sapatas, em geral de cobre e refrigeradas a água. A soldagem ESW é usada na fabricação de peças pesadas, principalmente de aço estrutural. O processo é usado tipicamente em juntas de 13 a 500 mm de espessura, competindo de forma favorável com processos de soldagem a arco quanto maior for a espessura da junta.
- **Soldagem Oxi-gás (*Oxifuel Welding - OFW*):** compreende um grupo de processos de soldagem que utilizam o calor produzido por uma chama de combustível gasoso e oxigênio para fundir o metal de base e, se usado, o metal de adição. O processo é

usado principalmente na forma manual, mas existem aplicações mecanizadas, particularmente quando o processo é utilizado com a aplicação de pressão, sendo, neste caso, denominado de soldagem a gás por pressão (**Pressure Gas Welding - PGW**). Diferentes gases combustíveis podem ser utilizados, mas o mais comum para a soldagem dos aços e de outras ligas metálicas é o acetileno. Durante a operação, a chama resultante da mistura gás-oxigênio na ponta do maçarico é usada para a fusão localizada do metal de base e a formação da poça de fusão. O soldador movimenta a tocha ao longo da junta para conseguir a sua fusão uniforme e progressiva, adicionando, se for o caso, metal de adição. Este processo é mais usado na soldagem de chapas finas (em geral, com uma espessura inferior a 6mm) e de tubos de pequeno diâmetro e na soldagem de reparo, podendo ser usado para aços, em particular aços carbono, e para ligas não ferrosas. O equipamento básico para soldagem manual consiste de fontes de oxigênio e gás combustível, reguladores de vazão, mangueiras e do maçarico. O equipamento para soldagem OFW é muito versátil, podendo ser utilizado, através de mudanças de regulagem ou troca de bicos do maçarico, para corte a oxigênio, tratamento térmico de pequenas peças e para brasagem.

- **Soldagem com Feixe de Elétrons (*Electron Beam Welding - EBW*)**: é um processo de união baseado na fusão localizada da junta através de seu bombardeamento por um feixe de elétrons de alta velocidade. O feixe de elétrons é emitido por um canhão eletrônico e focalizado, através de lentes eletromagnéticas, em uma região muito pequena da junta (diâmetro da ordem de 10^{-1} mm) o que permite uma elevada concentração de energia. Durante o bombardeamento, parte da energia cinética dos elétrons é convertida em calor, fundindo e vaporizando parte do material da junta e criando um furo (*keyhole*) através do material. Quando este furo é movido ao longo da junta, o material líquido flui em torno do mesmo e se solidifica na parte posterior da poça formando a solda. Esta forma de operação permite obter cordões de solda com uma elevada razão penetração/largura (de até 30:1) e com velocidades de até 200mm/s. A baixa energia de soldagem resultante, minimiza problemas de distorção e contração da junta e permite trabalhar com peças já usinadas. Permite também soldar mais facilmente metais dissimilares de condutividade térmica diferente desde que estes tenham compatibilidade metalúrgica. O feixe de elétrons pode atravessar uma junta de menor espessura, soldando-a e, ainda, atingir uma outra junta abaixo da primeira, permitindo, assim, a soldagem de juntas não acessíveis por outros processos. A soldagem EBW é geralmente feita em alto vácuo (0,13 a 133m Pa),

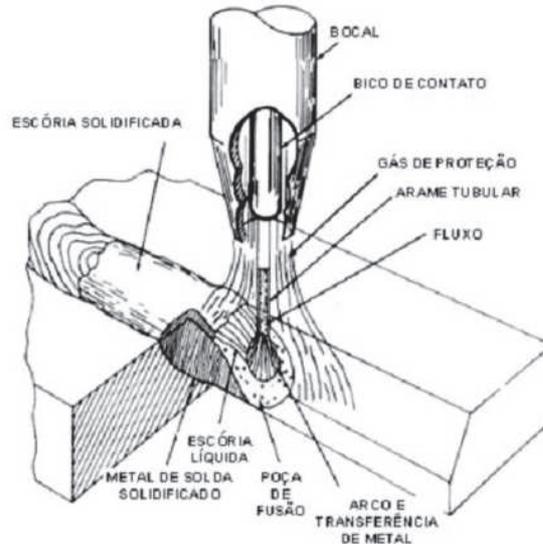
embora existam variações do processo, que trabalham com menores penetrações, que podem operar com um vácuo médio (0,13 a 3000Pa) ou a pressão ambiente. Um equipamento típico para a soldagem EBW inclui a câmara de vácuo, uma fonte de energia e canhão eletrônico (operando tipicamente com 30 a 175kV e 50 a 1000 mA), dispositivos de focalização do feixe, um sistema para observação ou rastreamento do feixe e um sistema para manipulação da peça e/ou do canhão eletrônico. O processo é extremamente rápido e pode soldar, em um único passe, peças de grande espessura (aço, até 100mm, e alumínio, até 150mm). A soldagem é basicamente limitada a juntas de topo e sobrepostas.

- **Soldagem a Laser (*Laser Beam Welding - LBW*):** é um processo de união baseado na fusão localizada da junta através de seu bombardeamento por um feixe de luz concentrada coerente e monocromática de alta intensidade. De forma similar a soldagem EBW, este feixe de alta intensidade é suficiente para fundir e vaporizar parte do material da junta no ponto de entrada do feixe no material, causando um furo (*keyhole*) que penetra profundamente no metal de base. A soldagem a laser é um processo de alta velocidade, ideal para aplicações automatizadas, mas exigindo um perfeito ajuste das peças. Devido ao custo elevado do equipamento de soldagem, o processo é tipicamente usado em aplicações com um grande volume de soldas ou em aplicações críticas que necessitem de características especiais do cordão ou uma grande reprodutibilidade. O processo é mais utilizado na soldagem de peças de menor espessura com uma elevada velocidade de deslocamento. A eficiência do equipamento LBW é baixa, de 8 a 15%, necessitando de grandes unidades de refrigeração para aplicações de alta potência. Embora o equipamento seja muito sofisticado, ele é projetado para ser usado por operadores, não necessitando de soldadores altamente treinados. Vários equipamentos LBW podem, com pequenas modificações, ser usados para operações de corte ou de tratamento térmico superficial.

- **Soldagem com Arame Tubular (*Flux Cored Arc Welding - FCAW*):** é um processo no qual a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento destes por um arco entre um eletrodo tubular contínuo e a peça. O eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo que desempenha as funções de estabilizar o arco e ajustar a composição da solda. O processo apresenta duas variações principais: soldagem auto-protegida, em que o fluxo interno fornece toda a proteção necessária na região do arco, e soldagem com proteção gasosa, em que a proteção é fornecida por um gás, semelhante ao

processo GMAW. Em ambas as formas, o processo é normalmente operado na forma semiautomática, utilizando basicamente o mesmo equipamento do processo GMAW. A figura 2 ilustra o processo básico FCAW.

Figura 2 – Processo básico de soldagem FCAW



Fonte: Fortes (2004).

No quadro abaixo são apresentadas as vantagens, limitações e principais aplicações do processo do processo de soldagem FCAW.

Quadro 4 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem FCAW

Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada produtividade e eficiência; • Soldagem em todas as posições; • Custo relativamente baixo; • Produz soldas de boa qualidade e aparência; • Equipamento relativamente caro; • Pode gerar elevada quantidade de fumos; • Necessita limpeza após soldagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga; • Soldagem de fabricação e de manutenção; • Soldagem de partes de veículos; • Soldagem de montagem no campo.

Fonte: Modenesi et al. (2012).

2.3 Descontinuidades em Juntas Soldadas

Caracteriza-se como descontinuidade qualquer interrupção da estrutura típica de uma junta soldada. Desta forma, considera-se como descontinuidade a falta de homogeneidade nas características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do metal de solda. (MODENESI, 2001).

De acordo com Novais (2010), as descontinuidades geralmente são geradas por desvio do processo, falhas operacionais nos equipamentos ou acessórios. Esses desvios podem ocorrer de forma isolada ou combinada, devido às características diferenciadas dos processos de soldagem, as vantagens, aplicações e limitações inerentes a cada um deles.

As descontinuidades podem ser classificadas quanto à origem e forma. Com relação à origem, as descontinuidades podem ser:

- **Geométricas:** são aquelas geradas na etapa de montagem e soldagem. Os exemplos mais comuns são a falta de fusão, falta de penetração, mordedura, desalinhamento, superposição e a deposição insuficiente.
- **Metalúrgicas:** são aquelas originadas por fenômenos metalúrgicos presentes na poça de fusão como o refino, desoxidação, desgaseificação e as transformações de fases no estado sólido, estas tanto na zona fundida (ZF) quanto na zona termicamente afetada (ZTA).

Com relação à forma, as descontinuidades podem ser classificadas em:

- **Planas:** são as que apresentam praticamente duas dimensões: é o caso das trincas de solidificação e das trincas introduzidas por hidrogênio, da falta de fusão e penetração. Essas descontinuidades geram uma concentração de tensão muito elevada nas suas extremidades e geralmente devem ser reparadas.
- **Volumétricas:** são as que apresentam três dimensões: poros, inclusões de escória e inclusões de tungstênio, no caso do processo TIG (GTAW). Elas acarretam concentração de tensão bem menor que as descontinuidades planas e, por isso, são menos críticas em comparação a elas.

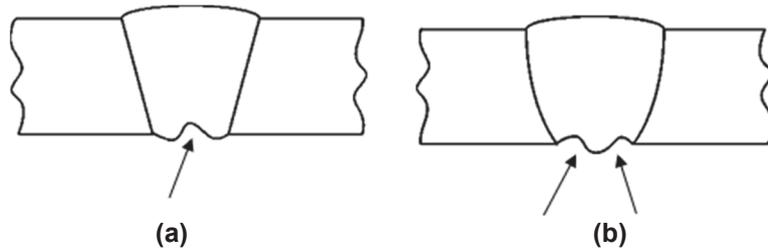
As descontinuidades podem ainda, ser **externas**, isto é, alcançam a superfície visível da solda, ou podem ser totalmente **internas**, não sendo nesse caso, detectáveis por inspeção superficial da solda. Podem estar localizadas na Zona Fundida (ZF), na Zona Termicamente Afetada (ZTA), no metal de solda e no metal base.

Conforme Novais (2010), a correta escolha do processo de soldagem, bem como o conhecimento das características das descontinuidades e a forma de minimizá-las é uma importante ferramenta gerencial para o controle de custos, segurança da estrutura e dos colaboradores envolvidos e garantia da qualidade do produto.

Algumas das principais discontinuidades que podem estar presentes em uma junta soldada conforme Comissão de Normalização Técnica (CONTEC) (2009) são:

- **Concavidade:** reentrância na raiz da solda, podendo ser: (a) central, situada ao longo do centro do cordão; (b) lateral, situada nas laterais do cordão.

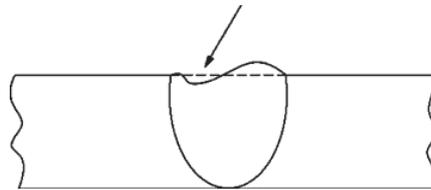
Figura 3 – Concavidade



Fonte: CONTEC (2009).

- **Deposição insuficiente:** insuficiência de metal na face da solda.

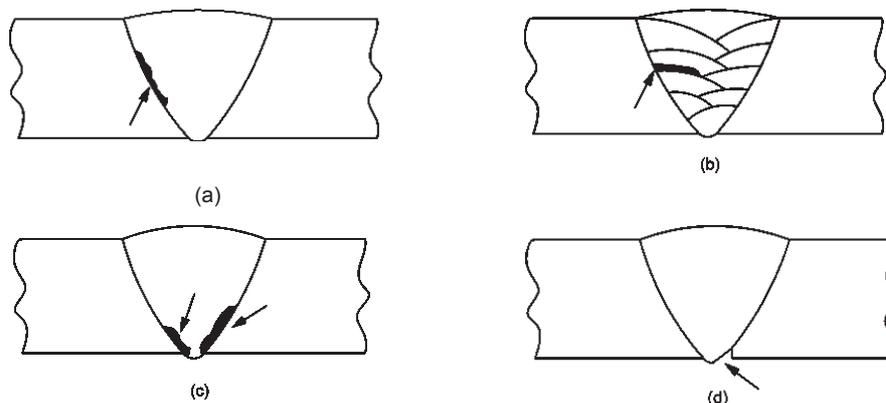
Figura 4 – Deposição insuficiente



Fonte: CONTEC (2009).

- **Falta de fusão:** fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada: na zona de ligação (a), entre os passes (b) ou na raiz da solda na zona de ligação (c) e (d).

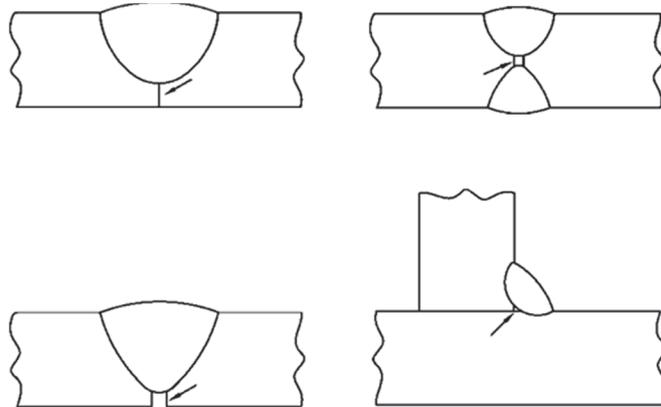
Figura 5 – Falta de fusão



Fonte: CONTEC (2009).

- **Falta de penetração:** insuficiência de metal na raiz da solda.

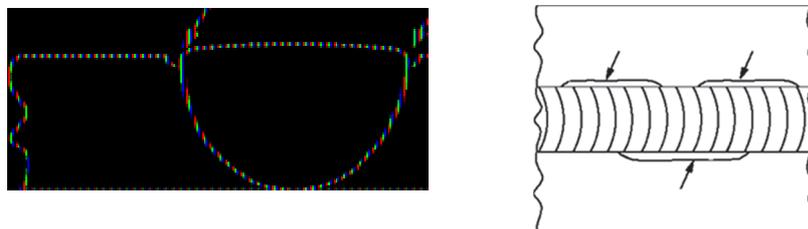
Figura 6 – Falta de penetração



Fonte: CONTEC (2009).

- **Mordedura:** depressão sob a forma de entalhe no metal de base, acompanhando a margem da solda.

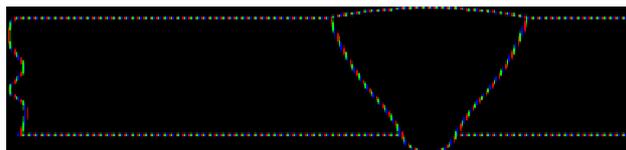
Figura 7 – Mordedura



Fonte: CONTEC (2009).

- **Penetração excessiva:** metal da zona fundida em excesso na raiz da solda.

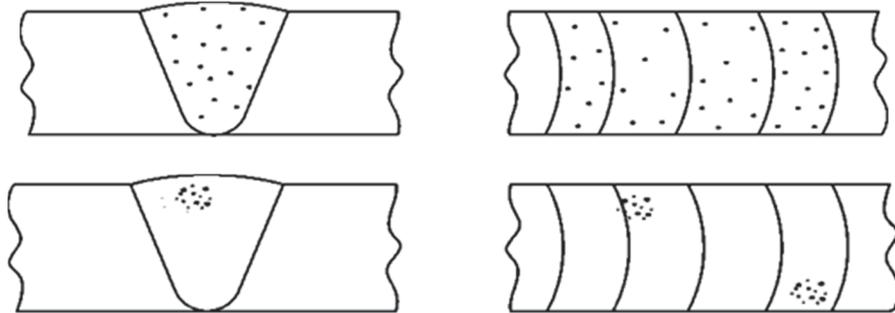
Figura 8 – Penetração excessiva



Fonte: CONTEC (2009).

- **Porosidade:** conjunto de poros distribuídos de maneira uniforme, entretanto, não alinhado.

Figura 9 – Porosidade

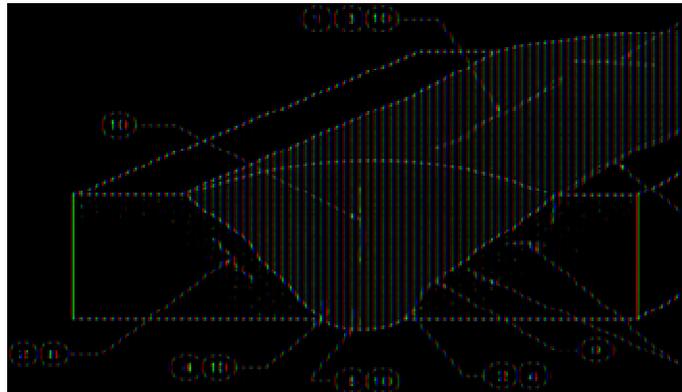


Fonte: CONTEC (2009).

- **Trinca:** descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material.

Figura 10 – Tipos de trincas

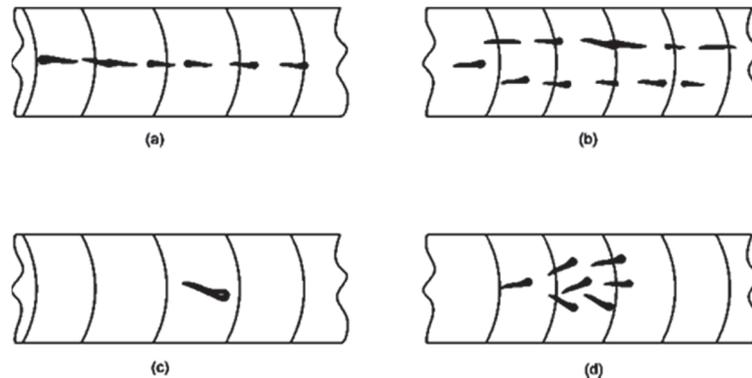
- 1 - Trinca na face
- 2 - Trinca na ZTA
- 3 - Trinca longitudinal
- 4 - Trinca na raiz
- 5 - Trinca de superfície na raiz
- 6 - Trinca na margem
- 7 - Trinca transversal
- 8 - Trinca sob cordão
- 9 - Trinca na zona de ligação
- 10 - Trinca na zona fundida



Fonte: AWS (2001).

- **Inclusão de escória:** material não metálico retido na zona fundida, podendo ser: alinhada (a) e (b); isolada (c); agrupada (d).

Figura 11 – Inclusão de escória



Fonte: CONTEC (2009).

É necessário enfatizar que a existência de descontinuidades em uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende da aplicação a que se destina o componente e é em geral caracterizada pela comparação das descontinuidades detectadas em relação ao critério de aceitação estabelecido em um código, norma, projeto ou contrato pertinente. Desta forma, são considerados defeitos em uma junta soldada aquela que apresenta descontinuidades ou propriedades que não atendam ao critério de aceitação exigido pelas normas aplicáveis. Juntas defeituosas, em geral, precisam ser reparadas ou mesmo substituídas. (MODENESI, 2001).

2.3.1 Ensaios Não Destrutivos para Detecção de Descontinuidades

Conforme Modenesi (2001), são considerados ensaios não destrutivos, aqueles que quando realizados sobre peças semiacabadas e acabadas não prejudicam, danificam e nem interferem com o futuro uso das mesmas.

Os ensaios não destrutivos envolvem todos os métodos para a medição e detecção de propriedades, capacidade de desempenho dos materiais metálicos, partes e peças de equipamentos e estruturas, por meio de energias físicas que não danificam as mesmas. Os métodos mais utilizados são:

- **Ensaio visual:** tem por finalidade, o controle de qualidade imediatamente e após qualquer operação de soldagem. Todos os outros ensaios não destrutivos devem ser executados após uma boa inspeção visual, que pode ser feito, à vista desarmada, ou com auxílio de lupa ou com aparelhos ou instrumentos para inspeção remota.

- **Teste de estanqueidade:** tem por finalidade a detecção de defeitos passantes em soldas, como por exemplo, as soldas de chapas de reforço, soldas em ângulos de juntas sobrepostas do fundo de tanques de armazenamento, soldas em ângulo de ligação fundo-costado, bem como para a detecção de defeitos passantes em chapas e fundidos. Um dos métodos baseia-se na aplicação de uma solução formada de bolhas, estando cada trecho inspecionado sujeito a um vácuo parcial.
- **Líquido penetrante:** o ensaio por meio de líquido penetrante é relativamente simples, rápido e de fácil execução. É utilizado na detecção de descontinuidades abertas para a superfície de materiais sólidos não porosos. A detecção das descontinuidades independe do tamanho, orientação, configurações da descontinuidade e da estrutura interna ou composição química do material. Este método é usado para a revelação de descontinuidades superficiais e é baseado na penetração destes por um líquido apropriado e na sua posterior remoção pela aplicação de um material absorvente (revelador) na superfície sendo examinada.
- **Partícula magnética:** o ensaio por meio de partículas magnéticas é utilizado para localizar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em peças de material ferromagnéticos, tais como, as ligas de ferro e níquel. O método consiste na aplicação de uma corrente de magnetização ou de um campo magnético à peça inspecionada, com o objetivo de se obter um campo magnético nesta. A presença de descontinuidades superficiais ou sub-superficiais irá produzir campos de fuga na região da descontinuidade, causando uma polarização localizada, que é detectada pelas partículas ferromagnéticas que são aplicadas sobre a peça.
- **Ensaio radiográfico:** o ensaio radiográfico utiliza os raios X e raios gama para mostrar a presença e certas características de descontinuidades internas ao material. O método baseia-se na capacidade que os raios X e gama possuem de penetrar em sólidos. Esta capacidade depende de vários fatores, tais como comprimento da onda da radiação, tipo e espessura do material. Quanto menor for o comprimento de onda, maior é a capacidade de penetração da radiação. Parte da radiação atravessa o material e parte é absorvida. A quantidade de radiação absorvida depende da espessura do material. Onde existe um vazio ou descontinuidade há menos material para absorver a radiação. Assim, a quantidade de radiação que atravessa o material não é a mesma em todas as regiões. A radiação após atravessar o material irá

impressionar um filme, formando uma imagem do material, comumente conhecida como radiografia.

- **Ultrassom:** este é o ensaio empregado pela empresa para detecção de descontinuidades para a composição dos índices (extensões) soldados e reprovados no controle de desempenho de soldadores. O ensaio por ultrassom usa a transmissão do som, que é uma forma de energia mecânica em forma de ondas, com frequências acima da faixa audível. A técnica pulso-eco, consiste basicamente de pulsos de alta frequência, emitidos pelo cristal, que caminham através do material. Estes pulsos refletem quando encontram uma descontinuidade na superfície do material. Esta energia mecânica (som) é recebida de volta pelo cristal, que transforma o sinal mecânico em sinal elétrico, que é visualizado na tela do aparelho de ultrassom. Basicamente, segundo Andreucci (2014), o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas. Os sinais captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados ecos, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material. O aparelho de ultrassom é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $S = V \times T$, onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (T) e a velocidade de propagação (V), no material. No exemplo demonstrado na figura 12, o feixe sônico do transdutor, incidiu na falha ocorrendo uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, enviando o sinal ao aparelho, mostrado na tela em forma de um pulso ou eco. (ANDREUCCI, 2014).

O quadro 5 apresenta as vantagens e limitações do ensaio por ultrassom em relação a outros ensaios.

Figura12 – Princípio básico da inspeção por ultrassom



Fonte: Andreucci (2014).

Quadro 5 – Vantagens e limitações do ensaio por ultrassom

Vantagens em relação a outros ensaios	Limitações em relação a outros ensaios
<ul style="list-style-type: none"> • Possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo: trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outras de difícil detecção por ensaio de radiografia ou gamagrafia; • Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção; • No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados; • Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultrassônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação; • A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder um reparo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor; • O registro permanente do ensaio não é facilmente obtido; • Faixas de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação do método; • Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, que demanda tempo de fábrica; • É frequente a insegurança do inspetor quanto a identificação da indicação detectada na tela do aparelho.

Fonte: Andreucci (2014).

3 METODOLOGIA

3.1 Método de Pesquisa

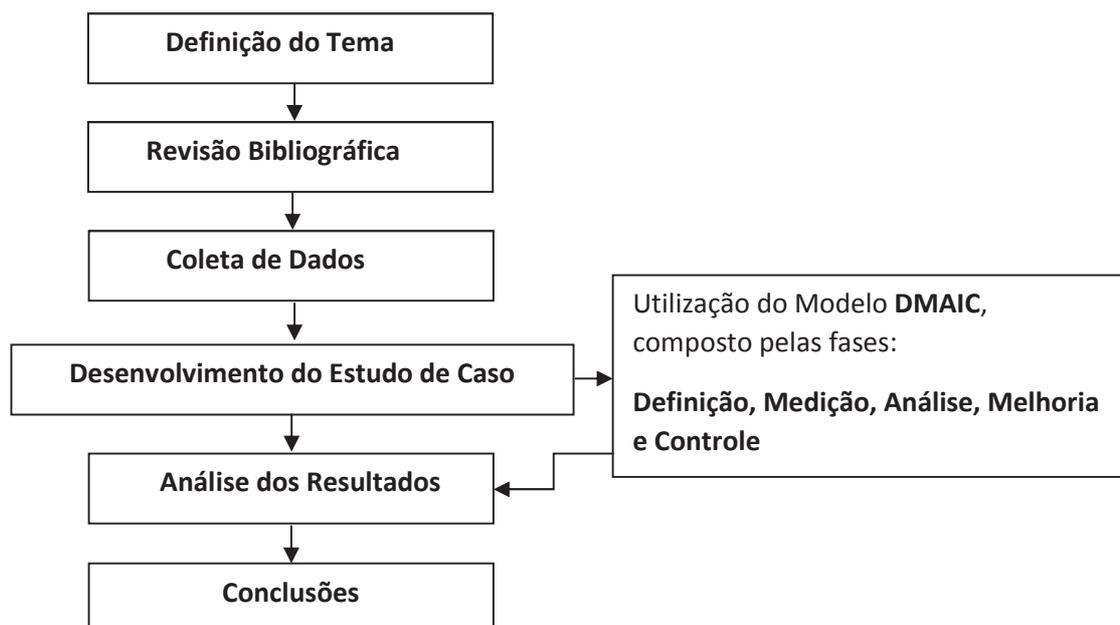
Trata-se de um estudo de caso de natureza aplicada e abordagem quantitativa. Segundo Gil (2002), o estudo de caso é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento. Para Yin (2003), o método de estudo de caso é utilizado frequentemente em situações da vida real, quando se pretende deliberadamente, cobrir as condições do contexto envolvido por se acreditar que elas são pertinentes para o estudo do fenômeno em análise.

Quanto aos objetivos da pesquisa, estes, enquadram-se pelo prisma explicativo. De acordo com Gil (2002), a análise pelo prisma explicativo busca identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, enriquecendo o conhecimento da realidade, visto que busca explicar a razão e o porquê dos acontecimentos.

3.2 Método de Trabalho

O método de trabalho utilizado para a realização deste estudo está detalhado conforme figura abaixo.

Figura 13 – Fluxo Metodológico



Fonte: Elaborado pela autora.

O método de trabalho aplicado consistiu basicamente nas etapas:

- Definição do tema: a definição do tema partiu da Direção, devido necessidade de informações confiáveis sobre o índice de retrabalho gerado pelo processo de solda.
- Revisão bibliográfica: realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os temas Seis Sigma, Processos de Soldagem e Descontinuidades em Juntas Soldadas. A pesquisa se deu a partir de livros, manuais, apostilas técnicas, normas técnicas, artigos, dissertações e teses.
- Coleta de dados: se deu basicamente através de observações estruturadas do processo de soldagem, consulta de informações do arquivo sobre os resultados dos testes realizados pelos soldadores (testes de qualificação/requalificação e testes de produção), simulação realizada com os inspetores de ultrassom para análise do MSA e entrevistas estruturadas com os soldadores. A Coleta de dados foi realizado pela autora e demais membros do projeto Seis Sigma.
- Desenvolvimento do estudo de caso: foi realizado estudo de caso sobre a aplicação da metodologia Seis Sigma para a redução do retrabalho em juntas soldadas no processo de soldagem FCAW em uma empresa de médio porte do Sul do Brasil. A aplicação da metodologia baseou-se no modelo DMAIC, composto pelas fases definição, medição, análise, melhoria e controle. Foi elaborado Mapa de Raciocínio com todas as atividades executadas ao longo da realização das cinco fases do modelo DMAIC (conforme item 4.1.3).
- Análise dos resultados: utilizou-se teste de hipóteses (teste de proporção para duas amostras) para comparar as proporções antes e após as ações de melhoria.
- Conclusões: foram avaliados e comparados os resultados gerais antes da aplicação da metodologia Seis Sigma e após a realização das ações de melhoria descritas na Fase Melhoria. As conclusões e considerações finais deste trabalho estão descritas no capítulo 5.

3.3 Método de Coleta de Dados

Basicamente a coleta de dados ocorreu através dos métodos de observação estruturada, entrevista estruturada, consulta a informações de arquivo e simulação.

Para a identificação do estado atual, ou seja, quantificação do índice de retrabalho gerado no processo de solda, utilizou-se uma lista de verificação onde foram anotadas todas as ocorrências dos defeitos e suas extensões em “mm”, bem

como o tipo de defeito encontrado, durante um período de 30 dias. Essa coleta de dados foi realizada pelos Encarregados de Solda e supervisionada pelo Líder do Projeto.

Foram realizadas observações estruturadas do processo de soldagem, base para o mapeamento detalhado do processo e da análise do fluxo de valor (ver itens 4.2.1 e 4.2.2), bem como consulta de informações do arquivo sobre os resultados dos testes realizados pelos soldadores, simulação realizada com os inspetores de ultrassom para análise do MSA e entrevistas estruturadas com 30% da equipe de soldadores acerca de suas percepções gerais sobre o processo de soldagem e possíveis causas para a ocorrência dos defeitos. Bryman (1995), define estes métodos de coleta de dados como:

- Observações estruturadas: trata-se de uma forma onde o observador coleta informações utilizando um plano pré-determinado, não fazendo parte na maioria das vezes da rotina da organização;
- Entrevista estruturada: tratam-se de questões mais elaboradas e assertivas, realizadas pelo entrevistador;
- Informações de arquivo: trata-se da utilização de material já existente no processo de análise de dados. Entretanto, não é considerado um método de coleta de dados, justamente por já existirem, não sendo necessária a realização de coletas diferenciadas como as vistas anteriormente;
- Simulação: neste caso solicita-se aos envolvidos que realizem simulações reais para coleta de dados, nas diferentes situações possíveis.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido em uma empresa de médio porte (Filial) do Sul do Brasil, atuante no setor de fabricação e montagem de estruturas metálicas para os segmentos de Óleo e Gás (principal segmento de atuação), Petroquímica, Siderurgia, Mineração, Infraestrutura e Papel e Celulose. A aplicação da metodologia Seis Sigma ocorreu no processo de soldagem e para tanto, foi utilizado o modelo DMAIC descrito no Capítulo 2, item 2.1.3.

4.1 Fase Definição

4.1.1 *Business Case* Inicial

A primeira fase do projeto iniciou pela definição do *Business Case*. A indicação do tema partiu da Direção, em função da necessidade de informações confiáveis sobre o processo de soldagem e o índice de retrabalho gerado pelo mesmo. Não haviam dados históricos confiáveis sobre o índice de retrabalho, pois as informações lançadas no sistema não representavam os dados totais gerados. Isto ocorria para que os números gerados e apresentados estivessem sempre dentro da tolerância definida nas normas e especificações técnicas do Cliente. Em função disso, havia uma grande divergência entre as lideranças sobre o índice real. A partir dessa necessidade, iniciou-se a estruturação do projeto.

4.1.2 Membros do Projeto

Após a definição do *Business Case* inicial, foram indicados para participar do projeto os colaboradores que poderiam contribuir com seus conhecimentos durante o desenvolvimento do projeto. Tomou-se o cuidado de selecionar uma equipe multidisciplinar, dentre clientes, fornecedores e atuantes no processo de soldagem. A autora deste trabalho atuou na orientação da aplicação da metodologia Seis Sigma. Desta forma, foram selecionados oito colaboradores (Líder do Projeto, *Black Belt* e demais membros), conforme descrito no quadro 6.

Quadro 6 – Membros do Projeto

Papel Genérico	Função na Empresa
<i>Champion</i> – Patrocinador	Diretor de Construção e Montagem
<i>Council/Leadership Group</i> – Facilitador	Gerente Industrial
<i>Process Leader</i> – Líder do Projeto	Coordenador de Solda
<i>Black Belt</i>	Analista da Qualidade
<i>Members</i> – Membros	Soldador Inspetor de Solda Encarregado de Solda Encarregado de Montagem Instrutor de Solda Psicóloga Organizacional

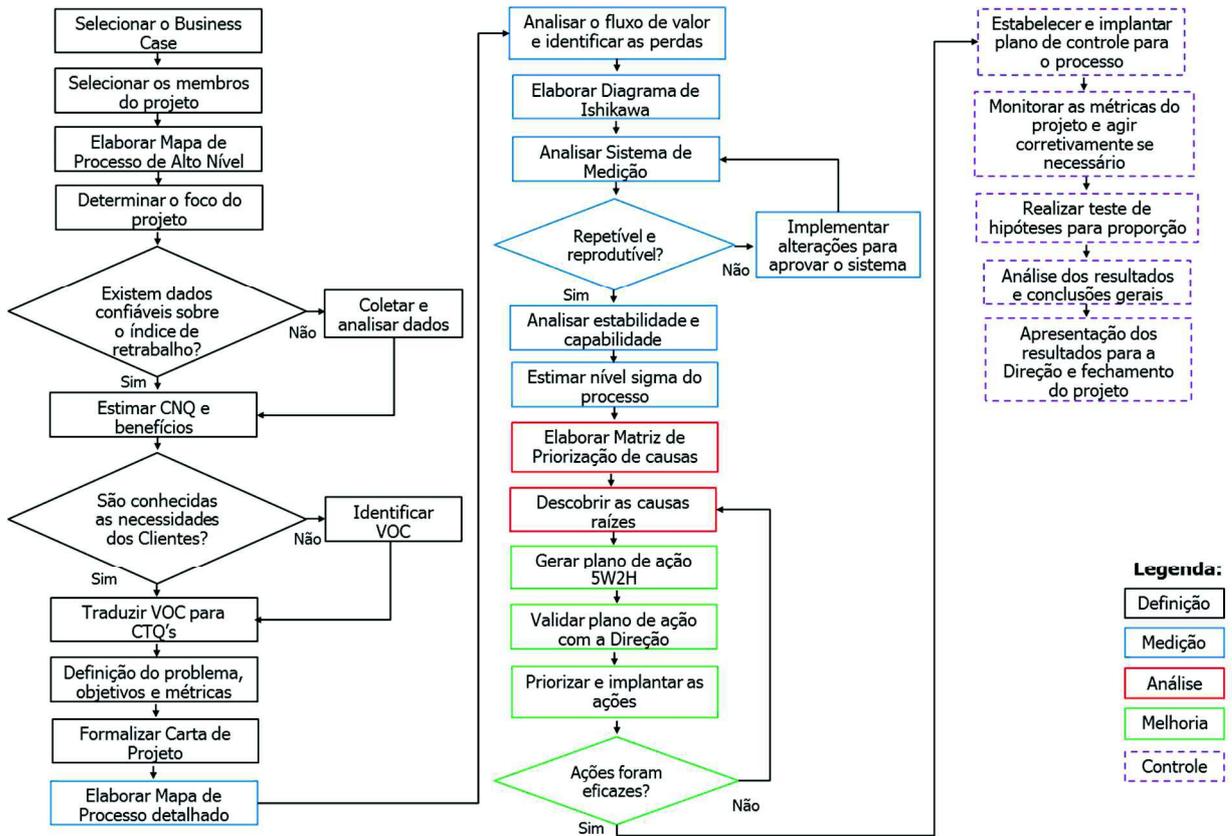
Fonte: Elaborado pela autora.

Após a definição dos membros do projeto, foram definidos o calendário de reuniões e responsabilidades gerais dos membros.

4.1.3 Mapa de Raciocínio

Para servir como apoio e guia durante a aplicação da metodologia Seis Sigma, foi elaborado o Mapa de Raciocínio do Projeto, com todas as etapas a serem seguidas desde a definição do *Business Case* até o encerramento do projeto. O Mapa de Raciocínio foi ajustado e revisado ao longo do projeto para que o mesmo refletisse as atividades de fato realizadas até a conclusão do projeto.

Figura 14 – Mapa de Raciocínio

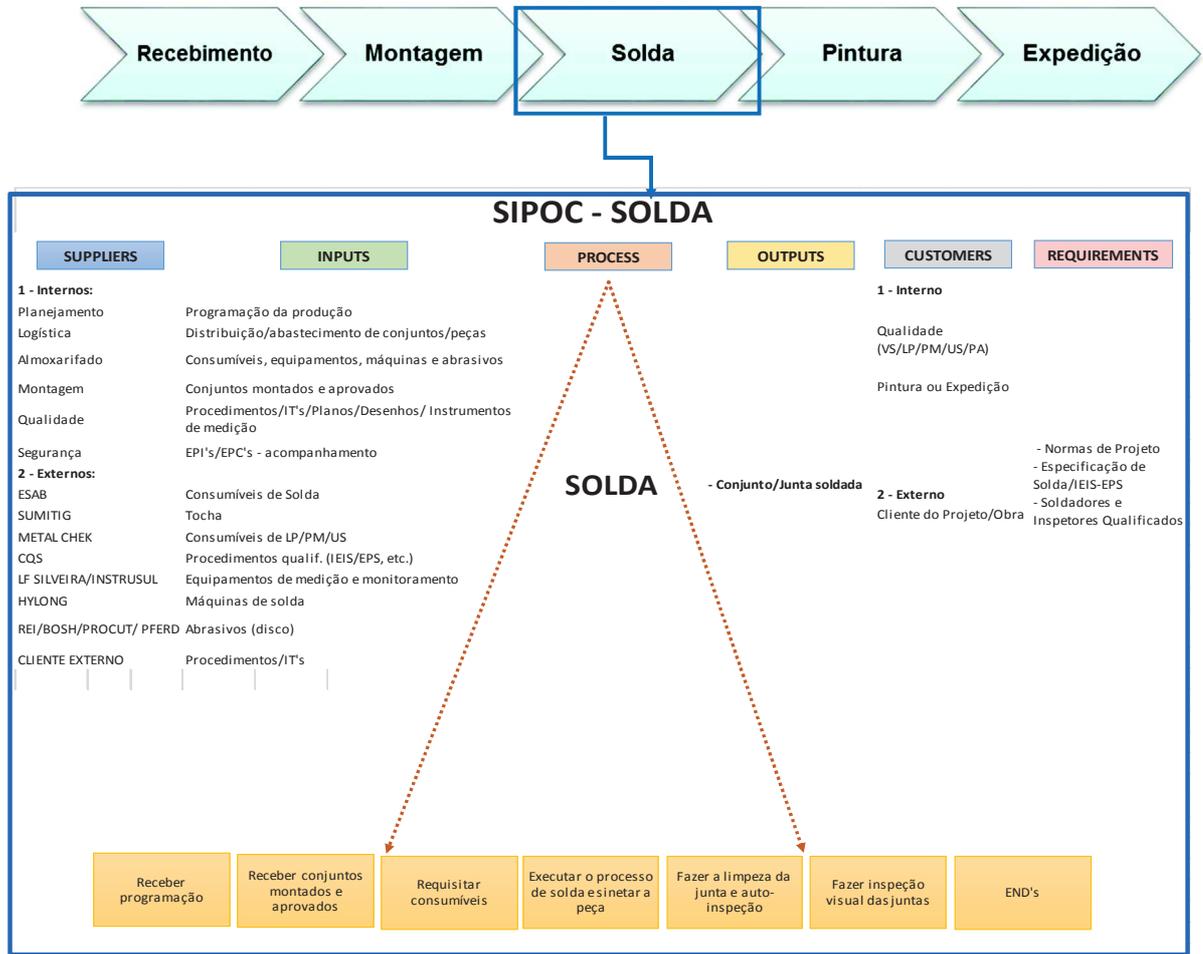


Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.4 Mapa de Processo de Alto Nível – “SIPOC”

Com o objetivo de proporcionar uma visão simples e clara das principais etapas do processo de soldagem (com suas respectivas entradas e saídas, requisitos, fornecedores e clientes (tanto internos quanto externos) foi elaborado o Mapa de Processos de Alto Nível (SIPOC – *Supplier – Input – Process – Output – Customer*), ilustrado pela figura 15.

Figura 15 – SIPOC processo de solda
Processos Principais



Fonte: Elaborado pela autora.

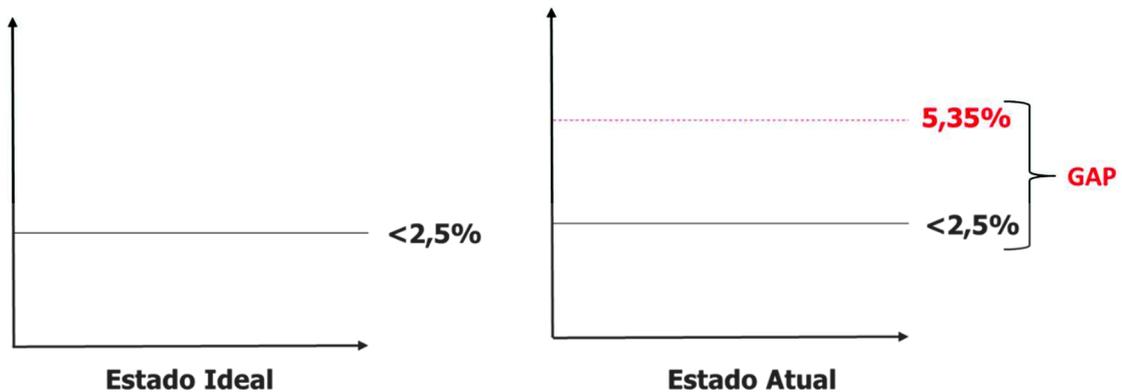
4.1.5 Determinação do Foco do Projeto

Para a determinação do foco do projeto, ou seja, o escopo e limitações, primeiramente foi estabelecido um plano de coleta de dados a ser aplicado durante 30 dias no processo de solda. Para a coleta de dados utilizou-se uma lista de verificação onde foram anotadas todas as ocorrências dos defeitos e suas extensões em mm (milímetros), bem como o tipo de defeito encontrado. O objetivo principal desta coleta de dados foi a quantificação do índice real de retrabalho gerado pelo processo (estado atual). Esta coleta de dados foi realizada por dois Encarregados de Solda, dentre eles, um dos membros deste projeto, e supervisionado pelo Líder do Projeto. O sistema atual de controle de dados não era confiável em função de que os dados reais não eram lançados em sua totalidade no sistema. Desta forma, apesar de

existirem dados históricos desde o início das atividades da empresa sobre o índice de retrabalho, os mesmos não puderam ser considerados, pois não eram dados reais e confiáveis. A tolerância estipulada pelo cliente é de no máximo 2,5% de comprimentos defeituosos de solda no desenvolvimento do perímetro soldado.

Durante os 30 dias de coleta de dados, foram inspecionados pelo método do ultrassom 1.093,917mm de solda (5599 juntas soldadas) e destas, 58.500mm (390 juntas soldadas) apresentaram defeitos. Com base nos dados levantados, constatou-se que o índice atual de retrabalho é de 5,35%, estando acima da tolerância máxima de 2,5% conforme definido pelo Cliente. A figura 16 ilustra o estado atual da empresa versus o estado ideal, considerando a meta estipulada pelo Cliente.

Figura 16 – Estado ideal x estado atual



Fonte: Elaborado pela autora.

Com os dados reais quantificados, iniciou-se um processo de análise mais detalhado acerca dos dados levantados, buscando estratificá-los para um melhor entendimento e foco adequado do projeto.

Nesses 58.500mm de soldas defeituosas foram encontrados três tipos de defeitos: falta de fusão, inclusão de escória e trinca. Desta forma, foi elaborado um gráfico de Pareto para demonstração do impacto de cada tipo de defeito na proporção observada. Os defeitos falta de fusão e inclusão de escória totalizaram 98% dos itens observados, conforme gráfico 1.

Gráfico 1 – Gráfico de Pareto: tipo de defeito



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o gráfico 2, foi possível verificar também, que a configuração da junta com a maior incidência de defeitos foi “JAPT” (junta de ângulo penetração total), totalizando 87% dos itens observados.

Gráfico 2 – Gráfico de Pareto: tipo de junta



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, foi possível identificar em qual posição de soldagem a incidência dos defeitos é maior. A posição de soldagem plana/horizontal totalizou 81% das observações, conforme gráfico 3.

Gráfico 3 – Gráfico de Pareto: posição de soldagem



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a obtenção de maiores conhecimentos sobre a natureza do problema, foram definidas as limitações do projeto, ou seja, onde de fato a equipe iria atuar. Foram definidos como itens pertencentes ao escopo do projeto: índice de defeitos detectados pelo método do ultrassom (último ensaio a ser realizado no processo de soldagem), processo de soldagem FCAW (processo utilizado na empresa durante a realização deste projeto), junta de penetração total (JPT) e três tipos de defeito: falta de fusão, inclusão de escória e trinca. Optou-se pela análise dos três tipos de defeitos, em função da existência de possíveis causas comuns entre eles.

Não fizeram parte deste estudo: índices de defeitos detectados por outros métodos, outros tipos de defeitos além dos três mencionados no parágrafo acima, outros processos de soldagem que não o FCAW e outros tipos de juntas que não JPT.

4.1.6 Custos da Não Qualidade - CNQ

Com o apoio da área financeira foram estimados os custos da não qualidade envolvidos no processo de retrabalho de solda.

Para a estimativa do custo do retrabalho foi considerado como base um defeito com extensão de 150mm. Os dados considerados para o cálculo foram: “HH” utilizado pelo soldador e inspeção e os custos gerais associados (despesas operacionais e custos de produtos e serviços vendidos), conforme quadro 7.

Quadro 7 – Estimativas dos custos do retrabalho

ESTIMATIVA CUSTO RETRABALHO - 150mm				
HH utilizado				
Soldador	Inspeção (VS/PM/US)	Total de HH Utilizado	Custo TOTAL do HH	Custo de 1 Retrabalho
1h30min	15min	1h45min	R\$ 92,07	R\$ 160,65

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a estimativa das horas gastas, tanto pelo soldador, quanto pela inspeção da qualidade, utilizaram-se os dados obtidos durante a análise do fluxo de valor (item 4.2.2), que será apresentado na Fase Medição.

Foi identificado que o custo de 1 retrabalho com extensão de 150mm é de R\$ 160,65 e consome 1h:45min de trabalho. Visto que no mês de julho 58.500mm necessitaram de retrabalho, o custo geral neste mês representou R\$ 62.653,50, conforme quadro 8.

Quadro 8 – Resumos dos custos do retrabalho no mês de julho/2015

Extensão Total Inspeccionada julho	1.093,917mm
Extensão Total Retrabalhada julho	58.500mm
Custo 1 Retrabalho (150mm)	R\$ 160,65
Total do Custo em Retrabalho julho	R\$ 62.653,50

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.7 Características Críticas da Qualidade - CTQ's

Para a identificação dos requisitos do Cliente e definição das características críticas da qualidade para o processo de soldagem, foram analisados os requisitos explícitos do Cliente formalizados nos documentos de referência (procedimentos, normas, especificações técnicas e contrato), foram analisados ainda, pesquisas de satisfação, bem como retornos e pareceres recebidos ao longo dos projetos realizados). Com base nesses dados foi gerado o quadro 9, onde estão descritos os requisitos e necessidades gerais (VOC), as CTQ's, bem como dimensão da qualidade associada e forma de controle vigente atribuída para cada uma das características críticas identificadas.

Quadro 9 – CTQ's

VOC	CTQ	Dimensão da Qualidade	Método de Controle
Qualificação do processo de soldagem	Emissão da EPS pelo Inspetor de Solda Nível II conforme requisitos da Norma do Projeto e especificação do Cliente	<ul style="list-style-type: none"> • Conformidade • Desempenho • Característica 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios laboratoriais • Juntas de teste de produção
Consumível homologado	Certificado do consumível emitido pelo Fabricante + Carta de aprovação emitida pela Sociedade Classificadora e consumível listado no site da FBTS	<ul style="list-style-type: none"> • Característica • Conformidade • Desempenho • Confiabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção de recebimento
Soldador qualificado	Aprovação em teste de qualificação conforme requisitos da Norma do Projeto e especificação do Cliente	<ul style="list-style-type: none"> • Característica • Conformidade • Desempenho 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de qualificação de soldador • Controle de desempenho
Montagem das estruturas/conjuntos conforme procedimento	Estruturas/conjuntos montados de acordo com as tolerâncias dimensionais especificadas na Norma do Projeto e especificação do Cliente	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho • Confiabilidade • Conformidade • Característica 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção dimensional de ajuste • Inspeção visual de ajuste
Soldagem conforme procedimento qualificado	Soldagem conforme requisitos e parâmetros de soldagem especificados na EPS (voltagem, amperagem e velocidade de soldagem)	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho • Confiabilidade • Conformidade • Característica 	<ul style="list-style-type: none"> • Acompanhamento de soldagem
Qualidade da solda	Realização de END's conforme critérios de aceitação para descontinuidades citadas na Norma do Projeto e especificação do Cliente	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho • Confiabilidade • Conformidade • Estética • Característica • Qualidade percebida 	<ul style="list-style-type: none"> • END's

Fonte: Elaborado pela autora.

De posse das informações e dados essenciais foram definidos claramente o problema, objetivos e métricas do projeto:

4.1.8 Definição do Problema

“O índice de retrabalho em juntas soldadas detectados pelo método de ultrassom para juntas de penetração total em julho de 2015 foi de 5,35%, uma diferença de 53,27% acima da tolerância máxima de 2,5% definida nas normas e especificações técnicas do Cliente”.

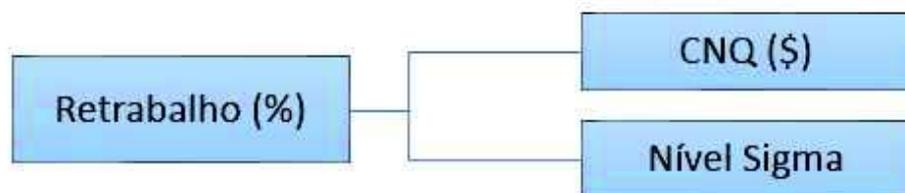
4.1.9 Objetivo

O objetivo do projeto é a redução em 30% do índice de retrabalho, passando dos atuais 5,35% para 3,75% até julho de 2016.

4.1.10 Métricas

Como métrica primária foi definido o índice de retrabalho de solda (medido em percentual), desdobrado em duas métricas secundárias: CNQ (medido em valor financeiro) e o nível sigma do processo.

Figura 17 – Desdobramento das métricas do Projeto



Fonte: Elaborado pela autora.

A projeção dos dados com o alcance do objetivo proposto de redução de 30% no índice de retrabalho está demonstrada no quadro 10.

Quadro 10 – Métricas do Projeto

MÉTRICAS	TIPO	BASE	META
Retrabalho (%)	Primária	5,35%	3,75%
CNQ (\$)	Secundária	R\$ 62.653,50	R\$ 43.857,45
Nível Sigma	Secundária	1,6118	1,7805

Fonte: Elaborado pela autora.

O *Saving* anual esperado para o projeto é de **R\$ 225.552,60**. Para o cálculo do *Saving* foram considerados os valores que deixariam de ser gastos com o retrabalho.

O indicador para acompanhamento mensal deste projeto foi definido como:

$$\% \text{ RETRABALHO} = \frac{\text{Comprimento Defeituoso} \times 100}{\text{Comprimento Total}}$$

4.1.11 Dificuldades e Barreiras

Algumas dificuldades e barreiras para a execução do projeto foram identificadas no início e ao decorrer da aplicação da metodologia Seis Sigma:

- Dados sobre o índice de retrabalho não confiáveis;
- Não liberação de integrantes do grupo para participar de algumas reuniões;
- Baixa produção e férias coletivas (dificultando coleta e análise de dados, bem como impossibilitando a realização de reuniões com todos os membros do projeto);
- Envolvimento e comprometimento da Alta Gerência.

4.1.12 Importância do Projeto para o Negócio

O objetivo principal deste projeto está alinhado às estratégias da empresa definidas pela Direção através do Mapa Estratégico. A redução do retrabalho e consequente redução dos custos associados, bem como melhoria geral do processo de solda, poderão contribuir diretamente para 07 das 15 estratégias (de produtividade e crescimento) inseridas no Mapa. As estratégias foram criadas com base nas 04 perspectivas do BSC (*Balanced Scorecard*): crescimento lucrativo, clientes encantados, processos eficazes e pessoas motivadas e preparadas. Dentro destas 04 perspectivas, as estratégias que poderão ter seu rendimento maximizado devido ao atingimento do objetivo deste projeto são: aumento da receita; expansão da produtividade e lucratividade; aumento do valor agregado do segmento de Óleo e Gás; qualificação da relação e geração de valor para o cliente; otimização dos métodos e processos construtivos; fortalecimento da cultura de melhoria contínua e por fim; atração, captação, retenção e desenvolvimento das melhores pessoas.

Cabe enfatizar ainda, a questão dos custos da qualidade. O custo da qualidade de um produto é um dos principais fatores que podem inviabilizar a produção e fornecimento do mesmo. Logo, com o objetivo de viabilizar o fornecimento e manter-se ativa em um período de crise econômica e de recessão no seu principal segmento de atuação, Óleo e Gás, a redução dos custos envolvidos no processo torna-se ainda mais necessária e fundamental. Os números levantados durante medição realizada em julho de 2015, demonstram que o processo de soldagem não atende às especificações do Cliente quanto ao índice de retrabalho. Um índice de 5,35% de retrabalho representou um custo da não qualidade de R\$ 62.653,50. Desta forma, torna-se fundamental a adoção da metodologia Seis Sigma para a redução do retrabalho no processo de soldagem, bem como para a manutenção e sobrevivência da empresa.

4.1.13 Cronograma

Quadro 11 – Cronograma do Projeto

FASES	MESES													
	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL
DEFINIR														
MEDIR														
ANALISAR														
MELHORAR														
CONTROLAR														

Fonte: Elaborado pela autora.

Obs.: Não foram realizadas atividades no mês de dezembro devido férias coletivas.

4.1.14 Carta de Projeto

Após todas as análises e definições iniciais geradas através dos dados obtidos, a Carta de Projeto foi formalizada, conforme demonstrado no quadro 12.

Quadro 12 – Carta de Projeto

Project Charter		Date:	17/ ago 15
Project title	REDUÇÃO DE RETRABALHO EM JUNTAS SOLDADAS		
Time line	Start date:	01/jun/15	Projected completion date: 29/jul/16
Champion	Name:	Department:	
Other steering members	D. R.	Direção	
Council/Leadership Group	Council Owner:	Strategic Alignment Metric	
	J. S.	% Retrabalho	
Team	Name:	Department:	Role & Committed Resources Allocation
Process Leader/Owner	G. D.	Produção/Solda (Coordenador)	
Black/Greenbelt	V. F.	Qualidade (Analista)	
Master Blackbelt Members	W. A.	Qualidade (Inspetor)	
	R. N.	Treinamentos/Solda (Instrutor)	
	E. M.	Produção/Montagem (Encarregado)	
	I. S.	Produção/Solda (Encarregado)	
	J. S.	Produção/Solda (Soldador)	
	N. B.	RH (Psicologa)	
Support Group	R. S.	SGI (Analista)	
Description			
Business Case Situation	O índice de retrabalho em juntas soldadas é uma métrica crítica do processo de Soldagem e um indicador de qualidade avaliado pelo Cliente. O controle (cálculo) dessa métrica se dá pelo volume (em milímetros) de juntas soldadas versus a extensão do defeito (aplicados após a inspeção de solda por processo). Esses dados são compilados quinzenalmente e a partir dessas informações é gerado o Controle de Desempenho de Soldadores, o qual irá apresentar o índice de retrabalho por soldador e o geral por projeto. A tolerância definida nas normas e especificações técnicas do Cliente para este índice é de até 2,5% de comprimentos defeituosos de solda inspecionada no desenvolvimento do perímetro soldado. Em medição realizada durante o mês de Julho, constatou-se que o índice de retrabalho foi de 5,35%, uma diferença de 53,27% acima da tolerância de até 2,5% de retrabalho.		
Scope	In:	Out:	
	Defeitos detectados pelo método do ultrassom (falta de fusão, inclusão de escória e trinca); Processo FCAW (processo de soldagem com arame tubular); juntas de penetração total.	Defeitos detectados por outros métodos; outros processos de soldagem; outros tipos de defeitos; outros tipos de juntas.	
Goals & Objectives	Reduzir em 30% o índice de retrabalho em juntas soldadas até Julho de 2016.		
Other Deliverables			
Project Steps	Phase	Deadline	Deliverables / Tools
	A IM - Project Launch	1-Jun-15	
	D efinition	28-Aug-15	
	M easurement	30-Oct-15	
	A nalysis	26-Feb-16	
	I mprovement	29-Jul-16	
	C ontrol	29-Jul-16	
	R eplicate Review		
Additional Team Commitments			

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Fase Medição

4.2.1 Mapa de Processo Detalhado

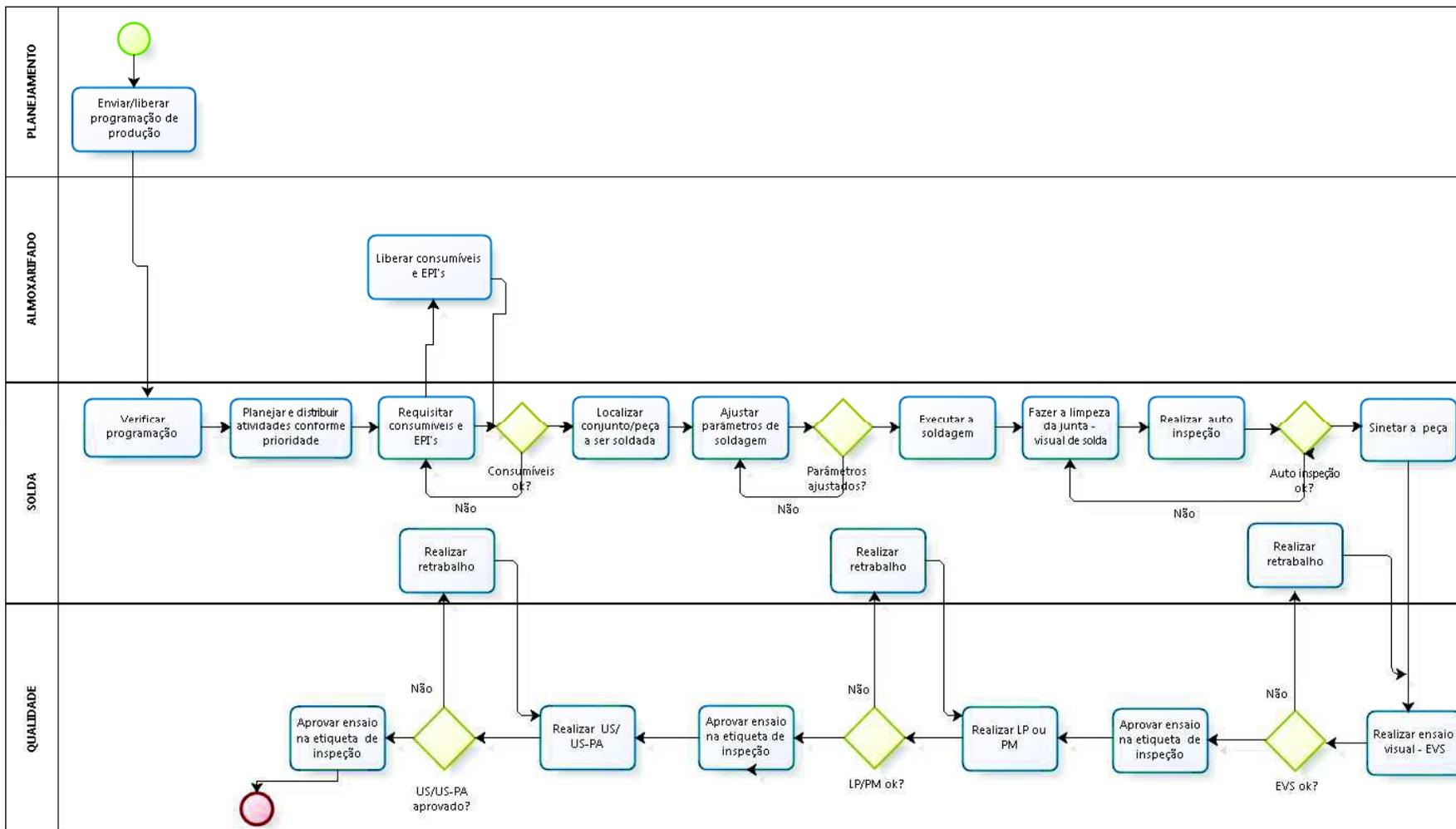
Para um entendimento mais detalhado do processo de soldagem, as principais atividades e pontos críticos envolvidos, foi realizado o mapeamento do processo, conforme ilustrado na figura 18.

A principal constatação obtida durante o mapeamento do processo foi a não realização de uma das atividades consideradas mais críticas pelos membros do projeto e que também é considerada um dos requisitos do processo de soldagem. Tal atividade, “verificação dos parâmetros de soldagem”, deveria ter sido realizada pelo soldador consultando o documento de referência (EPS) e aplicando os requisitos e parâmetros para o tipo de solda que estava sendo realizada. Os parâmetros de soldagem (voltagem e amperagem) foram ajustados pelo soldador na máquina de solda, porém, sem a consulta ao documento que define as faixas aplicáveis para a solda em questão.

Ao comparar o desenho do processo vigente elaborado pela Coordenação de Produção (inserido nos procedimentos internos), verificou-se a existência da atividade de verificação dos parâmetros de soldagem. Ou seja, esta é uma atividade estabelecida e necessária ao processo na visão dos Gestores da empresa, porém, na prática ela não está ocorrendo.

Com exceção da atividade de verificação dos parâmetros de soldagem que não foi realizada, as demais atividades realizadas durante o processo de execução da solda transcorreram conforme o previsto e indicado nos procedimentos internos.

Figura 18 – Mapa do processo de solda detalhado



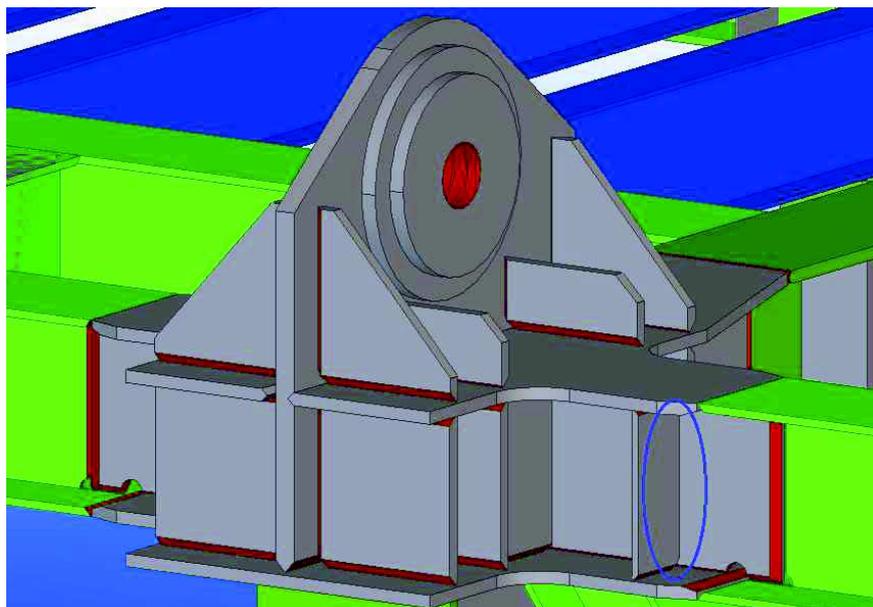
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Análise do Fluxo de Valor do Processo de Solda

Após o mapeamento do processo, foi realizada a análise do fluxo de valor para um entendimento ainda mais profundo do processo de soldagem, com foco na identificação das atividades agregadoras de valor, fontes de desperdícios, bem como o tempo empregado para realização de cada atividade.

Foi realizado o acompanhamento do processo de soldagem de duas juntas (desde a solicitação do material no almoxarifado até a liberação da junta soldada pela Inspeção da Qualidade). Cada uma das juntas possuía 640mm de extensão. Das duas juntas soldadas, uma apresentou defeito (junta 02), e esta necessitou passar pelo processo de retrabalho que está ilustrado pelas fotos que seguem (fotos 1 a 12) e pelo resumo das atividades inseridas no quadro 14.

Foto 1 – Modelo de configuração “3D” da junta a ser soldada



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 2 – Execução da soldagem



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 3 – Execução da goivagem no passe de raiz (remoção da solda)



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 4 – Soldagem finalizada



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 5 – Execução de limpeza final da junta (a) / inspeção por líquido penetrante – LP (b)



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 6 – Execução de inspeção visual - EVS



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 7 – Execução de inspeção por partículas magnéticas - PM



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 8 – Execução de inspeção por ultrassom - US



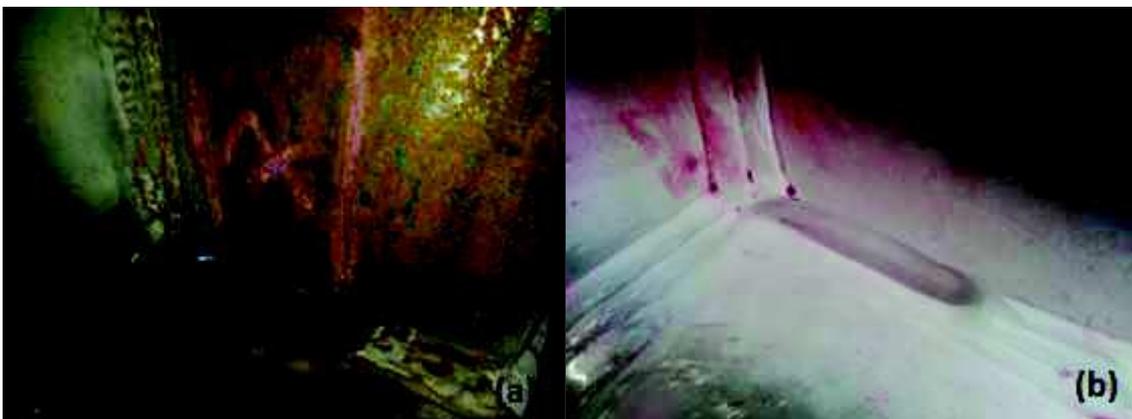
Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 9 – Identificação e marcação do defeito após inspeção por ultrassom - US



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 10 – Processo de retrabalho: goivagem (remoção da solda para localização do defeito) (a) / inspeção por líquido penetrante - LP (b)



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 11 – Soldagem do retrabalho finalizada



Fonte: Elaborado pela autora.

Foto 12 – Aprovação da solda após reinspeção por ultrassom - US



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos quadros 13 e 14 são apresentados os resumos das atividades, tempos utilizados durante o processo de soldagem das juntas 01 e 02 e fontes de perdas identificadas.

Quadro 13 – Resumo das atividades e tempos: soldagem junta 01

	ATIVIDADE	TEMPO	TIPO DE PERDA	CLASSIFICAÇÃO ATIVIDADES	
				AV / NAV	N / D
1	Retirar consumível de solda no almozarifado	00:02:18	MOVIMENTAÇÃO / ESPERA	NAV	D
2	Deslocamentos (até o local da solda, retirar e guardar material) *	00:25:20		NAV	D
3	Medir vazão do gás	00:00:13		NAV	N
4	Realizar pré-aquecimento	00:03:50		NAV	N
5	Medir temperatura da peça com pirômetro	00:00:08		NAV	N
6	Ajustar parâmetros da Máquina de Solda *	00:01:17		NAV	N
7	Preparação para iniciar/reiniciar atividade + colocação/retirada de EPI's *	00:14:24		NAV	N
8	Soldar	00:29:27		AV	N
9	Realizar Limpeza Interpasse *	00:07:21		NAV	N
10	Reparo no cabo da máquina de goivagem que rompeu	00:05:05	PRODUTO DEFEITUOSO	NAV	D
11	Realizar Goivagem	00:06:03		AV	N
12	Realizar limpeza final (com lixadeira/retífica)	00:17:16		NAV	N
13	Trocar equipamento rotativo (inclui troca de disco e ponta da retífica) *	00:01:32		NAV	N
14	Espera (para conclusão de atividade dimensional/montagem)	01:15:38	ESPERA	NAV	D
15	Realizar inspeção (LP - líquido penetrante)	00:01:22	SUPERPRODUÇÃO	NAV	D
16	Realizar inspeção (VS - visual de solda)	00:02:00		NAV	N
17	Realizar inspeção (PM - partícula magnética)	00:02:05		NAV	N
18	Reparo de VS (ponteamto)	00:01:11	PRODUTO DEFEITUOSO	NAV	D
19	Reinspeção de VS	00:00:08		NAV	D
20	Ajustar aparelho de ultrassom (ganho, escala, espessura, etc.)	00:00:33		NAV	N
21	Passar acoplante (metil) na peça	00:00:18		NAV	N
22	Realizar inspeção (US - ultrassom)	00:04:47		NAV	N
23	Anotar nº da junta no bloco de anotações para posterior baixa no sistema	00:00:35		NAV	N
		03:22:51			

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda:

AV = agrega valor

NAV = não agrega valor

N = necessária

D = desnecessária

O tempo total gasto desde o início do processo, da atividade 01 à atividade 23 consumiu 03:22:51. As atividades “AV” representaram 8,70% das atividades realizadas, ou 00:35:30. As atividades consideradas “NAV” representaram 91,30% das atividades, ou 02:47:41.

Ainda, dentro das atividades NAV, 07 foram consideradas como desnecessárias “D”, representando 30,43% das atividades NAV, ou ainda, 01:48:44. Durante o processo de soldagem da junta 01 foram identificados 04 tipos de perdas:

movimentação, produto defeituoso, espera e superprodução. A perda por superprodução se deu pela realização de atividade desnecessária e não solicitada pelo Cliente.

As atividades identificadas com “*” foram realizadas mais de uma vez ao longo do processo de realização da solda, sendo contabilizado o tempo total despendido para a realização das mesmas.

Quadro 14 – Resumo das atividades e tempos: soldagem junta 02

	ATIVIDADE	TEMPO	TIPO DE PERDA	CLASSIFICAÇÃO ATIVIDADES	
				AV / NAV	N / D
1	Deslocamentos (até o local da solda, retirar e guardar material) *	00:00:22	MOVIMENTAÇÃO	NAV	D
2	Preparação para iniciar/reiniciar atividade + colocação/retirada de EPI's *	00:02:21		NAV	N
3	Soldar (foto 2)	00:29:53		AV	N
4	Realizar Limpeza interpasse *	00:05:55		NAV	N
5	Realizar Goivagem (foto 3)	00:04:54		AV	N
6	Realizar limpeza final (com lixadeira/retífica) (foto 5a)	00:16:57		NAV	N
7	Trocar equipamento rotativo (inclui troca de disco e ponta da retífica) *	00:02:46		NAV	N
8	Realizar inspeção (LP - líquido penetrante) (foto 5b)	00:01:13	SUPERPRODUÇÃO	NAV	D
9	Parada e deslocamento até o ambulatório	00:18:10	MOVIMENTAÇÃO/ ESPERA	NAV	D
10	Espera para conclusão de atividades da montagem	00:20:00	ESPERA	NAV	D
11	Realizar inspeção (VS - visual de solda) (foto 6)	00:02:00		NAV	N
12	Realizar inspeção (PM - partícula magnética) (foto 7)	00:02:01		NAV	N
13	Ajustar aparelho de ultrassom (ganho, escala, espessura, etc.)	00:00:24		NAV	N
14	Passar acoplante (metil) na peça	00:00:12		NAV	N
15	Realizar inspeção (US - ultrassom) (foto 8)	00:05:12		NAV	N
16	Anotar nº JC no bloco para posterior baixa no sistema	00:00:22		NAV	N
17	Marcas defeito na peça (foto 9)	00:00:07		NAV	N
18	Retrabalho de solda (goivagem, limpeza, LP, limpeza, solda, limpeza final) (foto 10 e 11)	00:38:51	PRODUTO DEFEITUOSO	NAV	D
19	Aguardar liberação para realização de END's	01:46:48		NAV	D
20	Reinspeção (VS, PM, US) (foto 12)	00:04:27		NAV	D
		4:22:55			

Fonte: Elaborado pela autora.

No caso da realização da soldagem da junta 02, algumas atividades descritas para a soldagem da junta 01 (quadro 13) não necessitaram ser realizadas novamente, como por exemplo, as atividades 01, 03 e 06 (visto que a sua realização para a solda 01 foi suficiente e utilizada como referência para a solda 02), bem como as atividades 04 e 05, que foram realizadas uma única vez contemplando a soldagem das 02 juntas, que foram soldadas na sequência uma da outra.

O tempo total gasto desde o início do processo, da atividade 01 à atividade 20 consumiu 04:22:55. As atividades “AV” representaram 10% das atividades realizadas, ou 00:34:47. As atividades consideradas “NAV” representaram 90% das atividades, ou 03:48:08. Ainda, dentro das atividades NAV, 07 foram consideradas como desnecessárias “D”, representando 35% das atividades NAV, ou 03:09:51. Durante o processo de soldagem da junta 02 foram identificados 04 tipos de perdas: movimentação, superprodução, espera e produto defeituoso.

As atividades indicadas com “*” foram realizadas mais de uma vez ao longo do processo de realização da solda, sendo contabilizado o tempo total despendido para a realização das mesmas.

4.2.3 Diagrama de Ishikawa

O passo seguinte ao mapeamento de processos e da análise do fluxo de valor do processo de soldagem foi a elaboração do Diagrama de Ishikawa.

Buscou-se com a elaboração do Diagrama de Ishikawa identificar e ordenar as possíveis causas geradoras dos 03 tipos de defeitos identificados na Fase Definição (falta de fusão, inclusão de escória e trinca). Para a identificação das possíveis causas foram realizadas seções de *Brainstorming* entre os membros do projeto, baseadas em observações estruturadas (foi elaborada uma lista de verificação de itens a serem observados durante o processo de soldagem, tal lista foi subdividida em blocos de acordo com os “6M’s”: mão-de-obra, máquina, método, material, medição e meio ambiente) constantes no Diagrama de Ishikawa. Essa observação utilizando a lista de verificação com tópicos específicos durou cerca de uma semana e foi realizada em momentos diferentes pelos membros da equipe, objetivando identificar os fatores influenciadores para a ocorrência dos defeitos. Além destas fontes de dados, foram utilizados ainda, os dados e conhecimentos gerados através do mapeamento do

processo detalhado e análise do fluxo de valor, entrevistas com os soldadores, bem como, experiência e conhecimentos gerais sobre soldagem dos membros do projeto.

O primeiro diagrama elaborado (figura 19) contempla 02 tipos de defeitos: falta de fusão e inclusão de escória. A realização de um diagrama único ocorreu em função de que muitas possíveis causas são comuns para ambos os tipos de defeitos (na visão dos membros do projeto).

Foram consideradas 23 possíveis causas e destas, 02 foram consideradas como causas potenciais para a ocorrência dos defeitos falta de fusão e inclusão de escória: não cumprimento de procedimentos e ponteamto inadequado/mal realizado (sinalizadas com o “X”). Ainda, 07 foram consideradas como contribuidoras para a ocorrência destes 2 tipos de defeitos (sinalizadas com o “T”), e as demais foram consideradas como de pouco ou quase nenhum efeito para a ocorrência dos defeitos (sinalizadas com o “O”).

Figura 19 – Diagrama de Ishikawa: falta de fusão e inclusão de escória

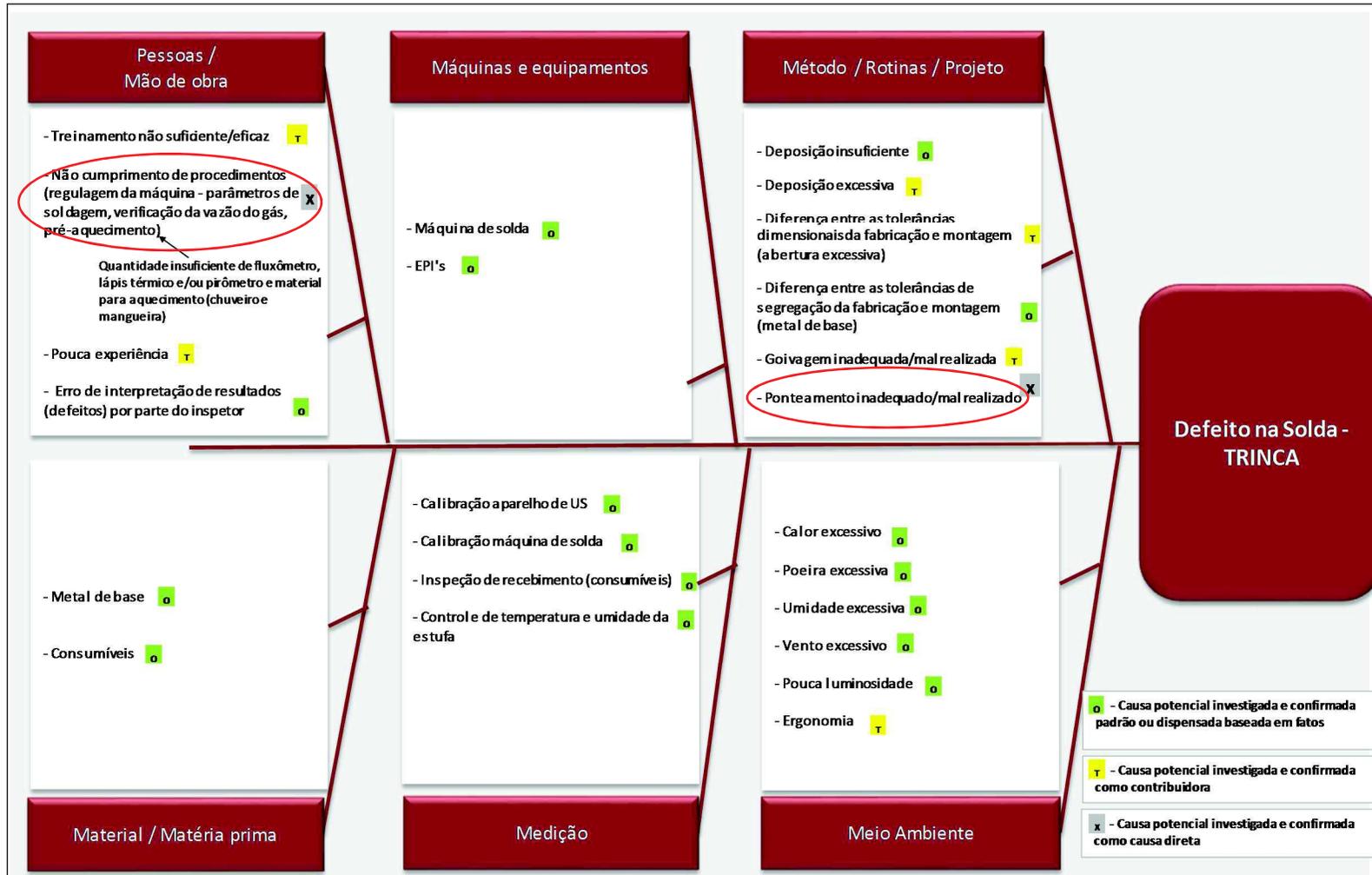


Fonte: Elaborado pela autora.

O segundo diagrama elaborado foi para o tipo de defeito trinca, conforme ilustrado pela figura 20.

Foram consideradas 24 possíveis causas e destas, 02 foram consideradas como causas potenciais para a ocorrência do defeito trinca: não cumprimento de procedimentos e ponteamto inadequado/mal realizado (sinalizadas com o “X”). Ainda, 06 foram consideradas como contribuidoras para a ocorrência de trincas (sinalizadas com o “T”), e as demais foram consideradas como de pouco ou quase nenhum efeito para a ocorrência de trincas (sinalizadas com o “O”).

Figura 20 – Diagrama de Ishikawa: trinca



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Análise do Sistema de Medição – MSA

Com o objetivo de garantir medições confiáveis, os inspetores responsáveis pela inspeção final (ultrassom) das soldas realizadas foram avaliados, considerando as medições por atributos (conforme ou não conforme). Para tanto, foram analisadas 50 juntas soldadas, previamente verificadas pela Qualidade, onde o resultado das inspeções já era conhecido. Cada uma das 50 juntas foram analisadas 3 vezes por cada inspetor utilizando o mesmo instrumento de medição (aparelho de ultrassom).

A análise dos dados foi realizada pelo *software* estatístico *Action*, onde os dados obtidos pelos inspetores foram comparados entre si e com o padrão previamente estabelecido. Os resultados obtidos seguem a seguir:

Quadro 15 – Dados gerais: avaliadores vs avaliadores

DADOS DO PROCESSO:				
1 (Linha) vs. 2 (Coluna)				
Tabela de Freqüências				
	1	0	Total	
1	138	3	141	
0	0	9	9	
Total	138	12	150	
Proporções Observadas				
	1	0	Total	
1	0,92	0,02	0,94	
0	0	0,06	0,06	
Total	0,92	0,08	1	
Proporções Esperadas				
	1	0	Total	
1	0,8648	0,0752	0,94	
0	0,0552	0,0048	0,06	
	0,92	0,08	1	
Kappa:			0,85	

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 16 – Concordância entre cada avaliador

Concordâncias entre CADA AVALIADOR			
1 (Linha) vs. 1 (Coluna)		2 (Linha) vs. 2 (Coluna)	
Concordância (abs):	50	Concordância (abs):	50
Concordância (%):	100	Concordância (%):	100
Intervalos de confiança		Intervalos de confiança	
Inferior:	92,9	Inferior:	92,89
Superior:	100	Superior:	100

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 17 – Concordância entre todos os avaliadores

Concordâncias entre TODOS AVALIADORES	
Concordância (abs):	49
Concordância (%):	98
Intervalos de confiança	
Inferior:	89,35
Superior:	99,95

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 18 – Dados gerais: avaliadores vs padrão

AVALIADOR 1 (Linha) vs. PADRÃO (Coluna)				AVALIADOR 2 (Linha) vs. PADRÃO (Coluna)			
<i>Tabela de Frequências</i>				<i>Tabela de Frequências</i>			
	1	0	Total		1	0	Total
1	141	0	141	1	138	0	138
0	0	9	9	0	3	9	12
Total	141	9	150	Total	141	9	150
<i>Proporções Observadas</i>				<i>Proporções Observadas</i>			
	1	0	Total		1	0	Total
1	0,94	0	0,94	1	0,92	0	0,92
0	0	0,06	0,06	0	0,02	0,06	0,08
Total	0,94	0,06	1	Total	0,94	0,06	1
<i>Proporções Esperadas</i>				<i>Proporções Esperadas</i>			
	1	0	Total		1	0	Total
1	0,8836	0,0564	0,94	1	0,8648	0,0552	0,92
0	0,0564	0,0036	0,06	0	0,0752	0,0048	0,08
Total	0,94	0,06	1	Total	0,94	0,06	1
Kappa: 1				Kappa: 0,85			

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 19 – Concordância entre o padrão e cada avaliador

Concordâncias entre O PADRÃO E CADA AVALIADOR			
Concordância (abs):	50	Concordância (abs):	49
Concordância (%):	100	Concordância (%):	98
Intervalos de confiança		Intervalos de confiança	
Inferior:	92,89	Inferior:	89,35
Superior:	100	Superior:	99,95
Taxa de erro:	0	Taxa de erro:	0
Taxa de falso alarme:	0	Taxa de falso alarme:	2,127659574

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 20 – Concordância entre o padrão e todos os avaliadores

Concordâncias entre PADRÃO E TODOS AVALIADORES	
Concordância (abs):	49
Concordância (%):	98
Intervalos de confiança	
Inferior:	89,35
Superior:	99,95

Fonte: Elaborado pela autora.

A concordância das inspeções entre cada inspetor foi de 100%. Já a concordância entre os resultados obtidos comparando-se as inspeções entre cada inspetor foi de 98%.

Os resultados das medições de cada inspetor comparada ao padrão estabelecido foi de 100% para o inspetor 1, com um índice *Kappa* 1 e para o inspetor 2 foi de 98%, com um índice *Kappa* de 0,85. A concordância geral dos dois inspetores relacionadas ao padrão foi de 98%.

Como os índices *Kappa* obtidos foram superiores a 0,75, o sistema de medição foi considerado confiável.

4.2.5 Capabilidade e Nível Sigma Inicial do Processo

Para o cálculo da capabilidade e nível sigma inicial do processo de solda, foi considerado como base a proporção de retrabalho atual (P%), ou seja, 5,35%.

Utilizou-se a fórmula do excel “INV.NORMP” para o cálculo, sendo obtido o seguinte resultado:

P%=	5,35
Nível Sigma (Z)=	1,6118
Cpk=	0,5373

O nível sigma encontrado foi de 1,6118 e o índice Cpk foi de 0,5373. O índice Cpk abaixo de 1 indica que o processo não é capaz.

4.3 Fase Análise

4.3.1 Matriz de Priorização XY

Após a identificação e análise inicial das principais variáveis de influência para ocorrência de defeitos inseridas nos Diagramas de Ishikawa (figuras 19 e 20), elaborou-se a Matriz de Priorização XY com todas as possíveis causas identificadas em ambos os Diagramas de Ishikawa.

Todas as variáveis de entrada (“Xs”) foram pontuadas pelos membros do projeto conforme a sua relação e/ou influência nas variáveis de saída (“Ys”), ou seja, os três tipos de defeitos. Foram atribuídos pesos às variáveis de saída (falta de fusão: 10, inclusão de escória: 8 e trinca: 5) conforme sua relevância e maior incidência no processo de solda. As pontuações atribuídas às variáveis de entrada conforme sua influência nas variáveis de saída seguiram a seguinte escala: 1 = nenhuma influência, 3 = média influência e 9 = alta influência.

Quadro 21 – Matriz de Priorização XY

XY Diagram Table

Demo		Process:	Welding									
		Date:	26/10/2015									
Delete		Ranking Scale: 1- none, 3- marginal, 9- highest										
View Summary			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Output Variables (Ys)	Falta de Fusão	Inclusão de Escória	Trinca							
		Description										
		Weight	10	8	5							
Input Variables (Xs)												Ranking
1	Treino não suficiente/eficaz		3	3	3							69
2	Não cumprimento de procedimentos		9	9	9							207
3	Pouca experiência		3	3	3							69
4	Deposição excessiva		3	3	3							69
5	Diferença entre as tolerâncias dimens. de fabricação e mont.		3	3	3							69
6	Calor excessivo		1	1	1							23
7	Poeira excessiva		1	1	1							23
8	Umidade excessiva		1	1	1							23
9	Deposição insuficiente		3	3	1							59
10	Diferença entre as tolerâncias de segregação da fabricação e mont.		1	1	1							23
11	Erro de interpretação do resultado (inspetor)		1	1	1							23
12	Máquina de solda		1	1	1							23
13	EPI's		1	1	1							23
14	Vento excessivo		1	1	1							23
15	Pouca luminosidade		1	1	1							23
16	Ergonomia		3	3	3							69
17	Metal de base		1	1	1							23
18	Consumíveis		1	1	1							23
19	Calibração aparelho de US		1	1	1							23
20	Calibração máquina de solda		1	1	1							23
21	Ponteamento inadequado/mal realizado		9	9	9							207
22	Inspeção de recebimento (consumíveis)		1	1	1							23
23	Controle de temperatura e umidade da estufa		1	1	1							23
24	Goivagem inadequada/mal realizada		3	3	3							69
												1232

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 22 – Resumo Matriz de Priorização XY
XY Diagram Summary

Process:	Welding
Date:	26/10/2015

Output Variables	
Description	Weight
Falta de Fusão	10
Inclusão de Escória	8
Trinca	5

Input Variables		
Description	Ranking	Rank %
Não cumprimento de procedimentos	207	16,80%
Ponteamto inadequado/mal realizado	207	16,80%
Treinamento não suficiente/eficaz	69	5,60%
Diferença entre as tolerâncias dimens. de fabricação e mont.	69	5,60%
Pouca experiência	69	5,60%
Deposição excessiva	69	5,60%
Ergonomia	69	5,60%
Goivagem inadequada/mal realizada	69	5,60%
Deposição insuficiente	59	4,79%
Calor excessivo	23	1,87%
Poeira excessiva	23	1,87%
Diferença entre as tolerâncias de segregação da fabricação e mont.	23	1,87%
Umidade excessiva	23	1,87%
Erro de interpretação do resultado (inspetor)	23	1,87%
Máquina de solda	23	1,87%
EPI's	23	1,87%
Vento excessivo	23	1,87%
Pouca luminosidade	23	1,87%
Metal de base	23	1,87%
Consumíveis	23	1,87%
Calibração aparelho de US	23	1,87%
Calibração máquina de solda	23	1,87%
Inspeção de recebimento (consumíveis)	23	1,87%
Controle de temperatura e umidade da estufa	23	1,69%

Fonte: Elaborado pela autora.

No quadro acima as variáveis de entrada foram ordenadas conforme maior pontuação. As variáveis não cumprimento de procedimentos e ponteamto inadequado/mal realizado obtiveram as maiores pontuações, totalizando cada uma 207 pontos ou 16,80% sobre a proporção total. Sete variáveis obtiveram pontuação entre 59 e 69 e as demais variáveis obtiveram pontuação de 23.

A equipe definiu como prioritárias para análise, as variáveis que foram consideradas como de média e alta influência para ocorrência dos defeitos, ou seja, aquelas que obtiveram pontuação igual ou acima de 59. Desta forma, das 24 variáveis iniciais inseridas na matriz, 9 foram priorizadas para continuidade das análises.

4.3.2 Análise dos 5 Por Quês

Após a seleção das 9 variáveis de entrada através da Matriz de Priorização XY, iniciou-se a análise dos 5 Por Quês objetivando identificar a causa raiz para a ocorrência destas variáveis.

Quadro 23 – Análise dos 5 Por Quês

1	Treinamento não suficiente/eficaz (3)	2	Não cumprimento de procedimentos (9)	3	Pouca experiência (3)	4	Deposição insuficiente (3)
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Não foi previsto plano de treinamento adicional ao curso de solda e reciclagens periódicas	↓	Negligência	↓	Profissional recém qualificado	↓	Alta velocidade de soldagem	↓
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Não há estruturado na empresa matriz de treinamentos e capacitações para os colaboradores de todas as áreas	↓	Falta de cobrança para utilização por parte dos Líderes	↓	Programa de treinamento não contempla período para aprendizado/acompanhamento em campo	↓	Técnica de soldagem inadequada	↓
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Não há colaborador específico designado para esta atividade e área/setor de treinamentos ainda não plenamente desenvolvido	↓	Metas de produtividade e prazos de entrega apertados e/ou mal definidos se sobressaem à utilização dos procedimentos	↓	Programa de treinamento não foi bem estruturado	↓	Pouca experiência	↓
		POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
		Cultura organizacional	↓	Falha no planejamento/adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	↓	Profissional recém qualificado	↓
						POR QUE?	ENTAO
						Programa de treinamento não contempla período para aprendizado/acompanhamento em campo	↓
						POR QUE?	ENTAO
						Programa de treinamento não foi bem estruturado	↓
						POR QUE?	ENTAO
						Falha no planejamento/adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	↓
CAUSA RAIZ:							
Não há colaborador específico designado para a atividade de treinamentos e área/setor de treinamentos ainda não plenamente desenvolvido		Cultura organizacional		Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda		Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	

5	Deposição excessiva (3)	6	Goivagem mal realizada (3)	7	Ergonomia (3)	8	Diferença entre as tolerâncias dimens. de fabricação e montagem (abertura excessiva) (3)	9	Ponteamento mal realizado/ inadequado (9)
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Baixa velocidade de soldagem	↓	Não existência de treinamento para atividade de goivagem	↓	Dificuldade de acesso ao local da solda	↓	As tolerâncias por norma para os processos (fabricação e montagem) são distintas	↓	Não utilização de dispositivo auxiliar de montagem	↓
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Técnica de soldagem inadequada	↓	Estrutura da Escola de Solda não permitia/comportava a realização desse treinamento	↓	Utilização em excesso de cavaletes ao invés de picadeiros	↓	Na concepção do projeto são consideradas as tolerâncias da Fabricação	↓	Resistência das Lideranças na utilização do dispositivo	↓
POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Pouca experiência	↓	Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	↓	Falha de planejamento na montagem (análise crítica)	↓	Não estava previsto inicialmente o repasse do escopo de montagem à Filial	↓	Metas de produtividade e prazos de entrega apertados e/ou mal definidos se sobressaem à utilização dos procedimentos	↓
POR QUE?	ENTAO					POR QUE?	ENTAO	POR QUE?	ENTAO
Profissional recém qualificado	↓					Escopo de montagem adicionado posteriormente e/ou definição estratégica e sem realização de nova análise crítica com envolvimento da Filial	↓	Cultura organizacional	↓
POR QUE?	ENTAO								
Programa de treinamento não contempla período para aprendizado em campo	↓								
POR QUE?	ENTAO								
Programa de treinamento não foi bem estruturado	↓								
POR QUE?	ENTAO								
Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	↓								
CAUSA RAIZ:									
Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda		Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda		Falha de planejamento na montagem (análise crítica)		Escopo de montagem adicionado posteriormente e/ou definição estratégica e sem realização de nova análise crítica com envolvimento da Filial		Cultura organizacional	

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme análise detalhada no Quadro 23, constatou-se que algumas causas raízes são comuns para mais de uma variável. A causa raiz encontrada para as variáveis pouca experiência, deposição insuficiente, deposição excessiva e goivagem mal realizada foi a falha no planejamento/adequação do curso e infraestrutura da escola de solda. Outra causa raiz compartilhada entre as variáveis não cumprimento de procedimentos e ponteamto mal realizado/inadequado foi a cultura organizacional.

Ressalta-se o fato de que a maioria dos soldadores são formados internamente, em escola de solda instalada nas dependências da empresa e com instrutor interno, sendo este, um dos membros deste projeto. A causa raiz “falha no planejamento/adequação do curso e infraestrutura da escola de solda” está estritamente relacionado à escola de solda interna da empresa.

4.4 Fase Melhoria

Durante a fase Melhoria foi elaborado o plano de ação baseado no modelo 5W2H. Para cada causa raiz identificada através do método dos 5 Por Quês na fase Análise, uma ou mais ações foram propostas objetivando eliminar e/ou reduzir os efeitos gerados por cada uma das causas. Para a geração das soluções utilizou-se todo o conhecimento adquirido nas fases Definição, Medição e Análise. Foram realizadas ainda, seções de *Brainstorming* e multivotação baseadas em critérios pré-definidos de impacto, tempo de implementação e custos envolvidos para a implementação das ações.

O plano de ação foi subdividido em 12 “macro ações” e destas, foram originadas mais 37 ações. Do total das 49 ações propostas, 44 ações foram implementadas, ou seja, 89,79% do plano de ação foi concluído. Este plano de ação foi formalizado no mês de março de 2016, porém, algumas ações e pequenos ajustes no processo foram realizados já a partir de novembro 2015, pois foram ações consideradas importantes e que não poderiam aguardar a análise e processo de priorização das mesmas. As ações que ainda não foram implantadas, apesar de já aprovadas pela Direção, por questões estratégicas e econômicas serão implantadas futuramente. O custo total para implementação das ações foi de R\$ 2.045,85. As principais ações propostas foram:

- Revisão e readequação do manual do curso de solda, com inserção de tópicos importantes e redistribuição da carga horária conforme itens mais importantes (sendo dada atenção especial na parte prática do curso, a soldagem nas posições plana/horizontal e juntas do tipo JATP – junta de ângulo penetração total, conforme identificado na fase definição como itens onde a ocorrência dos defeitos é maior);
- Revisão e readequação dos requisitos para o processo de seleção de candidatos ao curso de solda (inclusão de requisitos de entrevista coletiva, avaliação psicológica e avaliação médica);
- Implantação da escola de solda dentro das dependências da Fábrica. O local atual da escola não fornece a estrutura adequada para a realização de algumas atividades práticas necessárias. Ação aguardando definição da Direção;
- Implantação do PAP – Programa de Acompanhamento Prático. Finalizado o curso de solda, o colaborador receberá acompanhamento prático por até 4 meses onde terá suas atividades acompanhadas e passará por avaliação mensal antes de ser efetivado como soldador (caso tenha desempenho favorável mediante regras de avaliação do programa);
- Criação de matriz de capacitação anual para soldadores, com treinamentos bimestrais sobre os temas mais importantes e pertinentes da área. Anualmente essa matriz será revisada para incluir temas diferentes conforme a necessidade. Para fins desse plano de ação, todos os treinamentos previstos nesta matriz foram realizados com toda a equipe de solda;
- Implantação do Programa de Reconhecimento para soldadores com “0” retrabalho em solda. Para incentivar a melhoria contínua e cultura para cumprimento de procedimentos e padrões, criou-se um Programa de Reconhecimento específico para os soldadores. Além da regra de zero retrabalho, não podem ter mais de uma falta no mês, não podem ter sofrido advertência nos últimos 3 meses e precisam ter uma produtividade mínima de 10m de solda de penetração total. Ou seja, necessitam ter um desempenho de referência para os demais soldadores;
- Disponibilização de 2 murais para gestão a vista do processo de solda. Para fins de divulgação dos cursos, índices, dicas e orientações gerais da área de soldagem;
- Compra de instrumentos faltantes e essenciais para o processo de soldagem: fluxômetros (para medição da vazão do gás) e lápis térmico (para medição da temperatura da peça a ser soldada);

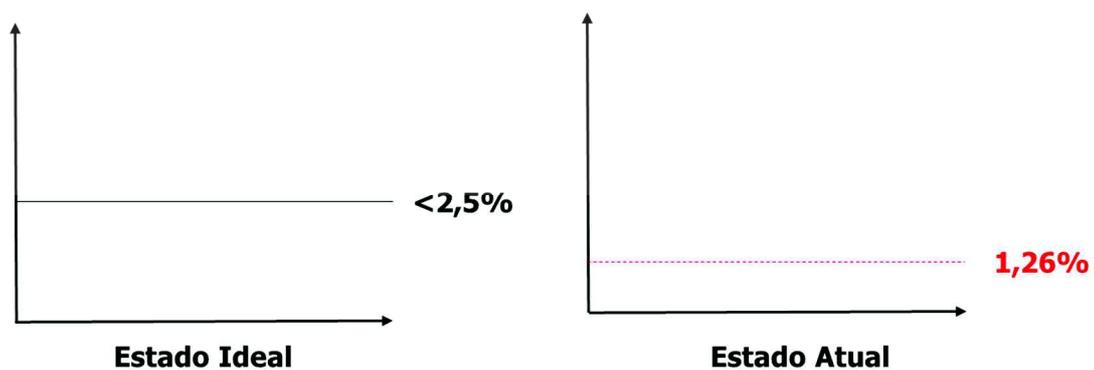
- Compra de mais *kits* de mangueiras de oxicorte (para realização do processo de pré-aquecimento das peças a serem soldadas);
- Realização de estudo para dimensionamento da área de soldagem. Este estudo foi realizado com o propósito de demonstrar à Direção e Engenharia as perdas do processo e possíveis influências para ocorrência dos defeitos devido abertura excessiva (aberturas da raiz). O documento de solda (EPS) especifica uma abertura máxima de 4mm e o estudo realizado em uma estrutura (“*Deck*”) inteira montada demonstrou que a média das aberturas ficou em 9mm. Os gastos não previstos para a soldagem dessa diferença de 5mm impactou negativamente o projeto em R\$ 222.560,94 (custos relacionados ao “HH” e consumíveis de soldagem adicionais). Foi sugerido pelo grupo ao setor de Engenharia que na concepção do projeto adicione sobre-metal nas extremidades dos perfis. Esta ação tem por objetivo garantir a abertura de raiz conforme pede a EPS, facilitar a soldagem, melhorar a produtividade e diminuir os custos em função da redução geral do tempo de soldagem empregado e da diminuição do material adicional gasto. Foi solicitado ao Gerente da Fábrica e Direção que garantam a formalização do compromisso dessa adição de sobre-metal por parte da Engenharia para o próximo projeto. Ação aguardando retorno da Direção;
- Montagem de “*Deck*” piloto nas condições mais próximas do ideal (com mais dispositivos auxiliares de montagem e mais picadeiros ao invés de cavaletes). Estas ações de melhoria na montagem facilitam o acesso ao local da solda bem como o ponteamto da junta. Comparando-se os resultados em termos de retrabalho de solda entre este *Deck* montado mais próximo da forma ideal e um *Deck* similar e montado da forma vigente na empresa, houve uma redução de 45% do retrabalho fazendo-se o uso dos dispositivos e cavaletes. Foi apresentado este resultado à empresa e solicitada a manutenção desta prática no processo de montagem.

As ações propostas e implementadas do plano de ação procuraram atuar nas causas raízes da ocorrência dos defeitos, de forma a eliminá-las e/ou minimizá-las. As ações foram simples e não necessitaram de grandes investimentos para sua realização. Basicamente foram desenvolvidas ações para melhorar as questões gerais de planejamento, cumprimento de procedimentos, treinamentos e reciclagens constantes e iniciativa para melhoria contínua e mudança cultural da organização. Um resumo do plano de ação elaborado está descrito no Quadro 25.

Em função da implementação das ações propostas, o índice de retrabalho foi reduzido para uma média mensal de 1,26% até julho de 2016 (baseado nos dados obtidos entre janeiro e julho de 2016). O custo total da não qualidade de janeiro a julho foi de R\$ 31.292,84, valor muito inferior se comparado apenas ao mês de julho de 2015, onde o custo foi de R\$ 62.653,50. A média mensal do custo da não qualidade ficou em R\$ 4.470,41 durante e após a implementação das ações. Com estes resultados, a equipe do projeto revisou a estimativa para o valor acumulado em economia em um ano para R\$ 698.197,08.

A figura 21 ilustra o comparativo entre o estado ideal, considerando a tolerância para o retrabalho definida pelo Cliente e o estado atual alcançado após a implementação das ações de melhoria.

Figura 21 – Estado ideal x estado atual após implementação das ações de melhoria



Fonte: Elaborado pela autora.

O nível Sigma e a capacidade do processo após a implementação das ações foram aumentados, bem como o índice de retrabalho (P%) foi reduzido, conforme demonstrado no quadro 24.

Quadro 24 – Comparativo dos resultados antes e após implementação das ações

Índices	Antes das ações	Após as ações
P%=	5,35	1,26
Nível Sigma (Z)=	1,6118	2,2383
Cpk=	0,5373	0,7461

Fonte: Elaborado pela autora.

Além das ações propostas no plano de ação, baseada nas fontes de perdas identificadas durante a análise do fluxo de valor do processo de solda (item 4.2.2), foram sugeridas algumas alterações com o propósito de evitar ou reduzir estas perdas. Para o caso das perdas por movimentação, foi sugerido que os armários e materiais de uso dos soldadores fossem deixados mais próximos ao local da solda, da mesma forma para o caso do deslocamento do soldador ao Almoxarifado no início das atividades, foi solicitado que os Encarregados e/ou colaboradores do Almoxarifado distribuam os consumíveis de soldagem nos postos de trabalho no início do turno de trabalho, evitando filas e esperas no Almoxarifado, demora para iniciar a atividade, bem como para otimizar o tempo dos soldadores para o planejamento e preparação das suas atividades enquanto os consumíveis são disponibilizados no local da soldagem.

Os membros deste projeto sugeriam ainda, que o ensaio não destrutivo por líquido penetrante (LP) não seja realizado, a menos que solicitado pelo Cliente. Além de gerar custo desnecessário, aumentar o tempo de espera pelos demais ensaios previstos, os profissionais que realizam este ensaio (no geral, auxiliares), não possuem o devido treinamento para aplicação e avaliação do resultado deste ensaio.

Quadro 25 – Resumo do plano de ação 5W2H

CAUSA RAIZ	POR QUÊ? (será feito)	COMO? (será feito)	QUANDO? PREVISTO (será feito)	QUANDO? REALIZADO (será feito)	QUEM? (fará)	ONDE? (será feito)	QUANTO? (custará)	
Não há colaborador específico designado para atividade de treinamentos e área/setor de treinamentos ainda não plenamente desenvolvido	Melhorar a formação dos profissionais e garantir reciclagens e atualizações constantes	1) Contratação de Psicóloga Organizacional para estruturação do setor de treinamentos, processos de seleção e outras demandas do setor	01/09/15	01/09/15	Direção	Fábrica	N/A	
		2) Revisar Manual do Curso de Solda, separando e organizando melhor os itens. Incluir tópicos faltantes (procedimentos não mencionados e itens técnicos dos equipamentos de soldagem)	20/04/16	20/04/16	V/W/ I/J	Fábrica	N/A	
		Definir e formatar Cronograma do Curso de Solda (parte teórica e prática) - com redefinição da carga horária	30/04/16	30/04/16	N/G	Fábrica	N/A	
		Formalizar descrição do cargo "soldador/instrutor" e apresentar a Gerência	17/03/16	17/03/16	G/N	Fábrica	N/A	
		Abrir processo seletivo interno e selecionar candidato para cargo "soldador/instrutor"	AGUARDANDO DEFINIÇÃO DA DIREÇÃO					
		3) Revisar processo de seleção de candidatos ao curso de solda (incluindo entrevista de seleção, avaliação psicológica e médica)	09/05/16	09/05/16	V/N	Fábrica	N/A	
		4) Elaborar projeto/planta para a nova Escola de Solda a ser alocada nas dependências da Fábrica	31/05/16	05/05/15	G/C	Fábrica	N/A	
		Montar a Escola	AGUARDANDO DEFINIÇÃO DA DIREÇÃO					
		5) Implantar PAP - Programa de Acompanhamento Prático	22/01/16	22/01/16	N/G	Fábrica	N/A	
		6) Montar Matriz de Capacitação anual para soldadores (treinamentos bimestrais)	17/03/16	17/03/16	N/G	Fábrica	N/A	
		Realizar treinamento sobre máquina de solda	27/04/16	27/04/16	Hsoldas	Fábrica	N/A	
		Fazer levantamento da quantidade faltante de porcas de vedação do conduíte da tocha e solicitar a compra caso não haja em estoque	27/05/15	02/05/16	V/G	Fábrica	N/A	
		Enviar técnicos da área de manutenção para treinamento técnico sobre manutenção das máquinas na sede da Hsoldas em SC	AGUARDANDO DEFINIÇÃO DA DIREÇÃO					
		Solicitar a compra e instalação de pistolas de ar para limpeza do conduíte (5 unidades)	27/05/16	23/05/16	G	Fábrica	R\$ 165,20	
		Realizar treinamento ITQ-MC-58 e ITQ-MC-59	28/07/16	28/07/16	V/W	Fábrica	N/A	
Realizar treinamento PQ-MC-99	28/07/16	28/07/16	V/W	Fábrica	N/A			
Falha no planejamento/ adequação do curso e infraestrutura da escola de solda	Garantir a efetividade do treinamento recebido e a qualidade/confiabilidade das soldas executadas através de acompanhamento prático	4) Implantar PAP - Programa de Acompanhamento Prático	22/01/16	22/01/16	N	Fábrica	N/A	
		Realizar treinamento defeitos de soldagem + custos da não qualidade, enfatizando deposição insuficiente/excessiva	24/06/16	28/06/16	V/W	Fábrica	N/A	
		Realizar treinamento sobre goivagem	25/07/16	13/07/16	V/W	Fábrica	N/A	
Cultura organizacional	Disseminar a cultura de melhoria contínua e de atendimento aos procedimentos internos e requisitos dos Clientes	Realizar treinamento sobre EPS	25/03/16	23/03/16	V/W	Fábrica	N/A	
		Elaborar LV específica para verificação da aplicação dos itens da EPS	31/03/16	01/04/16	V/W	Fábrica	N/A	
		Colocar em prática a aplicação das LV's. Aplicação semanal por parte dos Encarregados (5 amostras cada) + 4 amostras semanais por parte do Inspetor de Solda	13/04/16	14/04/16	V/W	Fábrica	N/A	
		Destacar com caneta marca texto ou outra, os itens principais das EPS's disponibilizadas para consulta nos postos de cópias da Fábrica	17/03/16	31/03/16	V	Fábrica	N/A	
		7) Implantar Programa de Reconhecimento para soldadores destaque (0 retrabalho)	14/04/16	28/05/16	N	Fábrica	N/A	
		8) Disponibilizar 2 murais para a Solda realizar as comunicações/divulgações específicas do processo	11/04/16	11/04/16	V/R	Fábrica	N/A	
		9) Providenciar a compra/disponibilização de fluxômetro para todos os soldadores	20/01/16	20/01/16	G	Fábrica	N/A	
		10) Providenciar mais kits de mangueiras de oxicorte (para pré-aquecimento)	30/03/16	23/03/16	G	Fábrica	R\$ 630,65	
		Providenciar disponibilização de lápis térmico para todos os soldadores	18/11/15	18/11/15	W	Fábrica	R\$ 1.250,00	
		Realizar treinamento sobre ponteamento conforme ITQ-MC-35	25/05/16	23/05/16	V/W	Fábrica	N/A	
		11) Realizar estudo para dimensionamento da área de soldagem em um Deck (3P2) com apoio do Insp. Dimensional/Solda. Após isso, levantar tempos e os custos associados	14/04/16	13/04/16	W	Fábrica	N/A	
Falha no planejamento na montagem (análise crítica)	Garantir a montagem da estrutura de forma que facilite o processo de soldagem	12) Realizar reunião com os Encarregados sobre montagem das estruturas (com utilização de dispositivos de montagem e mais picadeiros ao invés de cavaletes)	27/04/16	27/04/16	V	Fábrica	N/A	
		Montar um deck "piloto" nas condições mais próximas ao ideal (+ dispositivos e picadeiros) e avaliar resultado em termos de retrabalho comparado a outro deck montado da forma corrente	27/06/16	27/06/16	E	Fábrica	N/A	
Escopo de montagem adicionado posteriormente e/ou definição estratégica e sem realização de nova análise crítica com envolvimento da Filial	Garantir a abertura entre juntas conforme especificado na EPS	11) Realizar estudo para dimensionamento da área de soldagem em um Deck (3P2) com apoio do Insp. Dimensional/Solda. Após isso, levantar os tempos e custos associados	14/04/16	13/04/16	W	Fábrica	N/A	
		Aguardar formalização do "compromisso" do uso de sobre-metal para o próximo Projeto por parte da Engenharia	AGUARDANDO RETORNO DA DIREÇÃO/GERÊNCIA					

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Fase Controle

Na fase controle foram planejados e implementados métodos de controle para garantir a manutenção dos resultados das ações implementadas na fase melhoria. Alguns dos controles implementados basearam-se nas próprias ações geradas e foram estabelecidos como padrão logo após a implementação das mesmas. Nesta fase não houve a necessidade de criação ou alteração de procedimentos, visto que os principais documentos de referência para a execução de soldagem (EPS's – especificações do procedimento de soldagem) estão adequados e foram devidamente testados e aprovados, necessitando apenas que os soldadores façam a consulta ao documento antes de iniciar a soldagem (as EPS's ficam disponíveis em vários locais da fábrica).

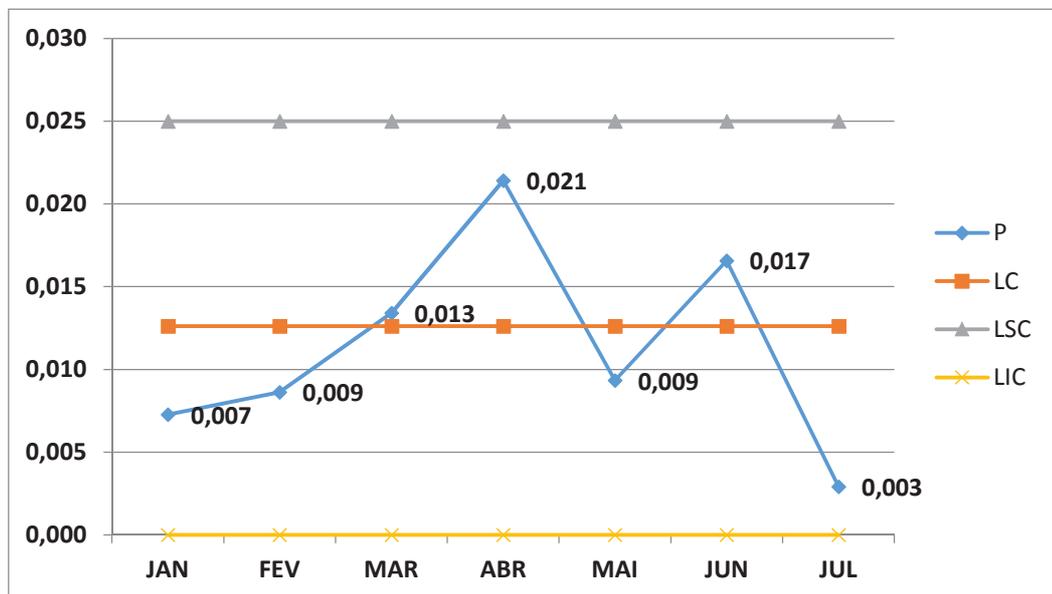
Os seguintes controles foram implementados:

- Auditorias técnicas do processo de soldagem: mensalmente o Encarregado de Solda realiza uma auditoria na sua equipe de solda frente aos padrões técnicos de soldagem estabelecidos. Tal controle visa garantir a aplicação das técnicas corretas e procedimentos adequados, bem como disseminação da cultura do cumprimento dos procedimentos. Após 6 meses de realização das auditorias mensais, as mesmas serão realizadas em um espaço de tempo maior (até que a consulta e utilização das EPS's se tornem hábito e rotina diária dos soldadores);
- Realização de treinamentos conforme matriz de capacitação anual para os soldadores. Os treinamentos têm por finalidade alinhar e atualizar os conhecimentos e técnicas dos soldadores;
- Manutenção do acompanhamento e análise da ocorrência de defeitos por parte do Coordenador de Solda e lançamento dos dados reais no sistema;
- Disponibilização e utilização de fluxômetros, “kits” de mangueira de oxicorte e lápis térmico, conforme requerido nos procedimentos de soldagem. Sendo o gerenciamento e controle das calibrações e quantidades destes instrumentos de responsabilidade da área da Qualidade;
- Acompanhamento e orientação aos soldadores quanto ao desenvolvimento da atividade de soldagem por parte do Inspetor e Encarregados de Solda;

- Utilização de pistolas de ar disponíveis em postos específicos da Fábrica, para limpeza de mecanismos da máquina de solda (conduite), a fim de evitar desgaste do bico de contato e facilitar tracionamento do arame de solda;
- Disponibilização de porcas de vedação do conduite da tocha para todas as máquinas de solda, a fim de evitar perda de gás. Os soldadores devem verificar diariamente o equipamento de soldagem para verificar se está tudo correto. Foram adicionados mais itens na lista de verificação de manutenção preventiva das máquinas de solda (que são realizadas mensalmente), a fim de verificar a falta ou avaria deste e outros itens que compõe todo o conjunto da máquina de solda.

No início do projeto, o índice de retrabalho era de 5,35%. Durante o desenvolvimento do projeto onde pequenas correções foram realizadas e ao final da implantação das ações propostas no plano de ações, o índice de retrabalho foi reduzido a uma média mensal de 1,26%. O acompanhamento mês a mês da evolução do índice de retrabalho pode ser verificado pelo gráfico 4, onde em todos os meses analisados o índice permaneceu dentro dos limites de controle.

Gráfico 4 – Gráfico de controle para acompanhamento do índice de retrabalho

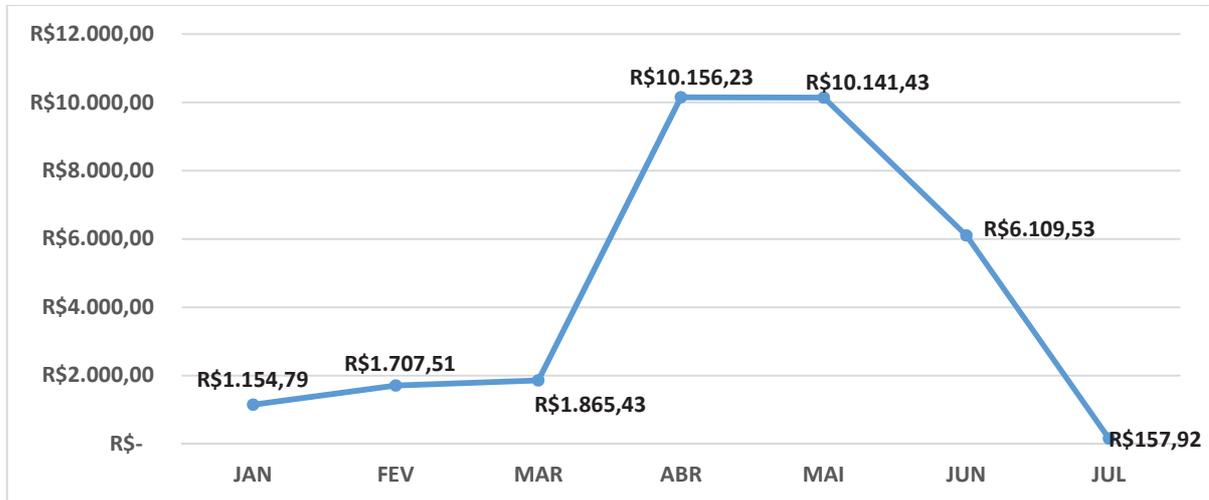


Fonte: Elaborado pela autora.

O mês de abril apresentou um índice de retrabalho próximo ao limite superior de controle, a isto, provavelmente atribui-se o fato de que foi o mês com o maior volume de solda realizado devido volume de estruturas a serem expedidas neste mês.

Em contrapartida o mês de julho apresentou um índice relativamente baixo, devido à entrega do projeto ao cliente e finalização do processo de soldagem.

Gráfico 5 – Gráfico de linhas para acompanhamento CNQ



Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico 5 demonstra o custo da não qualidade relacionado aos índices de retrabalho gerados mês a mês e apresentados no gráfico de controle 4. A meta original proposta pela equipe de projeto foi a redução em 30% no índice de retrabalho, ou seja, passar de 5,35% para 3,75%. Dessa forma, o CNQ passaria de R\$ 62.653,50 para R\$ 43.857,45. Como a meta foi superada, o índice de retrabalho passou de 5,35% para uma média mensal de 1,26%, e a média mensal do CNQ ficou em R\$ 4.470,41.

Ainda para a fase Controle, utilizou-se o teste de hipóteses para proporções com apoio do *software* estatístico *Action*. O propósito do teste foi comparar os resultados obtidos entre as proporções de retrabalho no início do projeto e após a implementação das ações.

As hipóteses utilizadas foram:

Hipótese nula: $H_0: p = p_0$

Hipótese alternativa: $H_1: p < p_0$

Onde: p = proporção de retrabalho atual (após as ações de melhoria) e p_0 = proporção de retrabalho no início do projeto.

$H_0: p = 0,0535$

$H_1: p < 0,0535$

Alfa " α " (significância) = 0,05

Quadro 26 – Poder do teste para 2 proporções

DADOS DO PROCESSO:

<i>Estatística</i>	<i>Valor</i>
Tamanho da Amostra 1	1093
Tamanho da Amostra 2	317
p1	0,0535
p2	0,0126
Poder	0,966473137
Nível de significância	0,05
Hipótese Alternativa	Diferente

Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 27 – Teste de proporção – duas amostras

DADOS DO PROCESSO:

<i>Variáveis (Conjunto de Dados 1)</i>	<i>Quantidade</i>
Sucesso	1035
Fracasso	58

<i>Variáveis (Conjunto de Dados 2)</i>	<i>Quantidade</i>
Sucesso	313
Fracasso	4

<i>Informação</i>	<i>Sucesso</i>
Proporções (Conjunto de Dados 1)	0,946935041
Proporções (Conjunto de Dados 2)	0,987381703
Z	-3,092367972
P-valor	0,001985665
Limite Inferior	-0,058546015
Limite Superior	-0,022347309

Fonte: Elaborado pela autora.

A conclusão estatística obtida após a realização do teste foi: rejeita-se a hipótese nula “ H_0 ” (P-valor menor do que o nível “ α ”), ou seja, há evidência suficiente a um nível de significância 0,05 para rejeitar a hipótese nula. A conclusão prática foi: houve redução na proporção, ou seja, a proporção atual após a implementação das ações de melhoria (“p”) é menor que a proporção no início do projeto (“ p_0 ”).

Para o fechamento da fase Controle foi elaborado relatório detalhado com as principais realizações e resultados gerados após a aplicação da metodologia Seis Sigma, sendo este relatório apresentado à Direção em reunião realizada na primeira semana de agosto de 2016.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema proposto neste trabalho foi a utilização da metodologia Seis Sigma para a redução de retrabalho em juntas soldadas em um processo de soldagem FCAW através de um estudo de caso aplicado em uma empresa de médio porte do Sul do Brasil.

A aplicação da metodologia Seis Sigma baseada no modelo DMAIC se mostrou adequada e eficaz para o alcance dos objetivos propostos neste estudo e para um maior conhecimento do processo de soldagem.

Identificou-se que o índice de retrabalho no início do projeto era de 5,35%, e a tolerância máxima indicada nas normas e especificações técnicas do Cliente para este índice era de até 2,5% de retrabalho. As principais fontes de perdas verificadas durante o mapeamento do fluxo de valor do processo de soldagem foram movimentação, espera, produto defeituoso e superprodução.

Foi possível verificar ainda, que as principais causas para a ocorrência dos defeitos falta de fusão, inclusão de escória e trinca, estavam relacionadas à falhas no processo de planejamento, tanto do curso e infraestrutura da escola de solda quanto da montagem das estruturas metálicas (processo que antecede a soldagem) e, a cultura organizacional da empresa de uma forma geral, onde o cumprimento de padrões e procedimentos não eram seguidos, bem como as Lideranças não atuavam de forma a garantir e disseminar a cultura de cumprimento de padrões e de melhoria.

Baseada nas causas para ocorrência dos defeitos e das demais fontes de perdas identificadas no processo de soldagem, foram propostas e implementadas ações de melhoria que objetivaram reduzir e/ou eliminar as causas raízes para a ocorrência de defeitos no processo de soldagem. As ações foram consideradas simples, de fácil implementação e baixo custo. Basicamente foram desenvolvidas ações para melhorar as questões gerais de planejamento, cumprimento de procedimentos, treinamentos e reciclagens constantes e, iniciativa para melhoria contínua e mudança cultural da organização. Algumas ações propostas no plano de ação, apesar de aprovadas pela Direção e Gerência, serão implementadas futuramente devido questões estratégicas.

Após a implementação de todas as etapas do modelo DMAIC (definição, medição, análise, melhoria e controle) foi possível superar a meta estabelecida para a redução do retrabalho (a meta era a redução em 30% do índice de retrabalho, ou

seja, passar de 5,35% para 3,75%), porém, o resultado atingido foi a redução do índice de retrabalho em 76% comparado ao nível inicial, passando de uma média mensal de retrabalho de 5,35% para 1,26% até julho de 2016. O teste de hipóteses para proporção realizado na Fase Análise, demonstrou que houve redução na proporção de retrabalho, ou seja, a proporção de retrabalho obtida após a implementação das ações é menor que a proporção verificada no início do projeto.

A economia resultante da redução do retrabalho em um período de 7 meses foi de R\$ 407.281,63. Baseado nos dados obtidos durante estes 7 meses, revisou-se a estimativa do *Saving* do projeto em um período de 12 meses para R\$ 698.197,08. O custo de implementação do plano de ação foi de R\$ 2.045,85, ou aproximadamente 0,29% do *Saving* total previsto para o projeto.

Salienta-se que tão importante quanto a utilização de ferramentas e técnicas estatísticas para apoio à identificação e análise dos dados, seguir sistematicamente a lógica das fases do DMAIC aliado ao Mapa de Raciocínio, foi determinante para o alcance dos resultados obtidos.

Os ganhos obtidos com a aplicação do Seis Sigma vão além do retorno financeiro, passando por ganhos intangíveis em transferência de conhecimentos entre os membros do projeto e aquisição de habilidades na utilização das práticas e ferramentas propostas no modelo DMAIC, início de uma mudança cultural e reconhecimento formal aos soldadores que têm um desempenho excelente (primeiro programa deste gênero implantado na empresa), são mais alguns um dos resultados imensuráveis deste projeto.

Dentre os principais obstáculos encontrados durante a aplicação da metodologia Seis Sigma pode-se citar a dificuldade em reunir a equipe para as reuniões programadas, devido às atividades exercidas dentro da empresa, férias coletivas e baixa produção, falta de informações confiáveis sobre o índice de retrabalho e pouco envolvimento e comprometimento da Gerência.

A metodologia Seis Sigma não se resume a métodos estatísticos, mas sim numa abordagem altamente focada e disciplinada para a resolução de problemas, aprendizagem organizacional, transformação e geração de ideias, trabalho em equipe, exploração e análise de dados com o foco na melhoria contínua e redução da variação que afeta os processos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Welding Handbook - Weld Science & Technology**. v.2, 9. ed. Miami, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS A3.0M/A3.0:2010). **Standard Welding Terms and Definitions**. 12. ed. 2010.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial – Ensaio por Ultrassom**. Ed. Maio. Abendi. 2014. 103 p. Apostila.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Routledge, 1995.

BRUE, G. **Six Sigma for small business**. Entrepreneur Press, 2006. Disponível em: <https://www.google.com.br/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-#safe=active&q=six+sigma+for+small+business+pdf>. Acesso em: 06 jul. 2016.

CHOWDHURY, S. **Working toward Six-Sigma Success**. Manufacturing Engineer, 127, p. 14, 2001.

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA (CONTEC). **N-1738**: descontinuidades em Juntas Soldadas, Fundidos, Forjados e Laminados. Rev. C 2009.

CORONADO, R. B.; ANTONY, J. **Critical success factors for the successful implementation of Six Sigma projects in Organizations**. The TQM Magazine, v.14, p. 92-99, n.2, 2002.

ECKES, G. **A revolução do Seis Sigma: o método que levou a GE e outras empresas a transformar processos em lucro**. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

FORTES, C. **Arames Tubulares**. ESAB BR, 2004. 51 p. Apostila.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HARRY, M.; SCHROEDER, R. **Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations**. New York: Currency, 2000.

KLEFSJÖ, B.; WIKLUND, N.; EDEGMAN, R. L. **Six Sigma seen as a methodology for total quality management**. Measuring Business Excellence, v.5, 2001.

MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, Editora O Lutador, 2006.

MARSHALL, I. J.; CIERCO, A. A.; ROCHA, A. V.; MOTA, E. B. **Gestão da Qualidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2004.

MODENESI, P. J. **Descontinuidade e inspeção em juntas soldadas**. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 16 p. Apostila.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I - Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 52 p. Apostila.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p. Apostila.

NOVAIS, P. R. S. **Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções**. Contribuição técnica nº 9. ABCM Associação Brasileira de Construção Mecânica, 2010.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **Estratégia seis sigma: como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PEREZ-WILSON, M. **Seis Sigma: compreendendo o conceito, as implicações e os desafios**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.

PYZDEK, T; KELLER, P. **Seis Sigma: guia do profissional: um guia completo para Green Belts, Black Belts e gerentes em todos os níveis**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011.

ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

SANTOS, A. B.; MARTINS, M. F. **A implementação dos projetos seis sigma contribuindo para o direcionamento estratégico e para o aprimoramento do sistema de medição de desempenho**. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, n.1, p. 1-14, dez. 2003.

SATOLO, E. G.; ANDRIETTA, J. M.; CAUCHICK MIGUEL, P. A.; CALARGE, F. A. **Análise da utilização de técnicas e ferramentas no programa Seis Sigma a partir de um levantamento tipo Survey**. Produção, v. 19, n. 2, p. 400-416, 2009.

SOUZA, M. H. B. **Aplicação da metodologia seis sigma para a redução de consumo de óleo combustível no forno de cal de uma fábrica de celulose Kraft**. 2013. 53 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Celulose e Papel, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, 2013.

TENNANT, G. **Design for Six Sigma: launching new products and services without failure**. USA: Gower, 2002.

WELCH, J. **Definitivo: Segredos do Executivo do Século**. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

WERKEMA, M. C. C. **Criando a cultura Seis Sigma**. Série Seis Sigma. v. 1. Nova Lima, MG: Werkema Ed., 2004.

WERKEMA, M. C. C. **Lean Seis Sigma: introdução às ferramentas do Lean Manufacturing**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2012.

YIN, R. K. **Case study reaserch – design and methods**. 3. ed. London: Sage Publications, 2003.