

GUILHERME BARBOSA DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
TUBOS LAMINADOS COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

GUILHERME BARBOSA DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
TUBOS LAMINADOS COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS**

Projeto de fim de curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para
obtenção do título de **Engenheiro
Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Luciano José Arantes

UBERLÂNDIA – MG

2017

GUILHERME BARBOSA DE SOUSA

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE
TUBOS LAMINADOS COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS**

Projeto de fim de curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para
obtenção do título de **Engenheiro
Mecânico**.

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Luciano José Arantes
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Rosenda Valdes Arencibia
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder saúde e sabedoria para alcançar meus objetivos, sem me desviar de Seus caminhos.

Aos meus pais, João Luiz e Sônia Maria, e aos meus irmãos, Letícia e Murilo, pelos conselhos e por me oferecerem o suporte e motivação necessários para que eu pudesse alcançar mais esta conquista.

À Verônica Vital Ferreira e família, pelo apoio e torcida durante toda minha trajetória. Obrigado pelos momentos alegres e pelas orações.

Aos meus familiares, pelos votos de sucesso e pelos momentos de alegria que sempre me proporcionaram.

Aos amigos de faculdade, pelos momentos alegres que passamos durante a vida acadêmica. Vocês podem ter certeza de que sem esse auxílio e companheirismo de vocês, esses momentos se tornariam muito mais difíceis.

Aos amigos da Paróquia Bom Jesus, pelas correntes de oração que me deram muita força, fé e garra para chegar onde estou.

Ao professor Dr. Luciano José Arantes, por aceitar mais este desafio. Seus conselhos e dicas como professor e, principalmente, como engenheiro me despertaram a vontade de seguir na profissão que tanto amo.

A Faculdade de Engenharia Mecânica, por ter contribuído de forma brilhante para minha formação profissional, durante a qual adquiri conhecimentos e compartilhei experiências, sem deixar de lado os valores éticos transmitidos durante a vida acadêmica.

Por último, agradeço ao Damien Herisson e ao Aurélien Buteri, em nome das empresas ArcelorMittal e Aperam, respectivamente, pela paciência, disponibilidade e confiança sem os quais nada disso seria possível.

DE SOUSA, G. B. **OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS LAMINADOS COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.** 2017. 58 p. TCC – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Este trabalho refere-se à otimização de uma linha de laminação de tubos com costura por meio de uma abordagem analítica com auxílio da simulação numérica visando modernizar as linhas de fabricação de tubos da planta da Aperam instalada em Ancerville, na França. O objetivo principal foi de melhorar a qualidade final dos tubos produzidos pela planta se baseando em duas premissas: a qualidade superficial (estado visual das superfícies internas e externas do tubo) e as propriedades mecânicas (deformação plástica transversal e limite de escoamento) do tubo ao final do processo de laminação. O estudo de melhoria foi adotado para duas linhas de laminação de tubos utilizadas na planta de Ancerville: Laser 27 e TIG 3. Inicialmente, uma análise do estado atual dessas duas linhas foi realizada a fim de se encontrar os defeitos que posteriormente seriam alvos no processo de otimização. Após essa primeira etapa, foi observado que a linha TIG 3 apresentava um grande número de defeitos superficiais e geométricos e, consequentemente, de ponto a se melhorar. Dessa forma, uma simulação numérica da linha TIG 3 foi lançada a fim de poder confrontar os resultados das simulações com os dados empíricos colhidos durante a análise da chapa metálica real. A correlação entre a simulação e o processo real permitiu compreender as origens dos defeitos superficiais. Levando em conta tanto os defeitos encontrados nas duas primeiras etapas de conformação quanto sua influência no restante do processo de fabricação, foi decidido realizar um estudo de otimização dessas duas etapas de conformação. Após análise minuciosa foi proposto um plano de ação visando corrigir, atenuar ou até mesmo eliminar os defeitos encontrados. Com um plano de ação definido, deu-se início à etapa de reconcepção das duas primeiras etapas de conformação da linha TIG 3. Após implementar todas as modificações, algumas simulações com essa nova concepção foram realizadas e os resultados obtidos foram discutidos a fim de avaliar se o plano de ação foi efetivo ou não.

Palavras-chave: Laminação de tubos com costura, simulação numérica

DE SOUSA, G. B. **OPTIMIZATION OF A MANUFACTURING ROLL FORMING PROCESS USING COMPUTATIONAL TOOLS.** 2017. 58 p. TCC – Mechanical Engineering Course, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This work refers to a welded pipe rolling line through an analytical approach using a numerical simulation aimed at modernizing the tube manufacturing lines of the Aperam site installed in Ancerville, France. The main objective was to improve the final quality of the tubes produced by the site based on two assumptions: the surface quality (visual conditions of the inner and outer surfaces of the tube) and the mechanical properties of the tube (transverse plastic deformation and yield strength) at the end of the rolling process. An improvement study was adopted for two tube rolling lines used in the Ancerville site: Laser 27 and TIG 3. Initially, an analysis of the current state of these two lines was performed in order to find the defects that would be targets in the process optimization. After this first step, it was observed that the TIG 3 line presented a large number of superficial and geometric defects and, consequently, several elements to be improved. Thus, a numerical simulation of the TIG 3 line was launched in order to be able to compare the results of the simulations with the empirical data collected during the analysis of the current metal strip. The correlation between the simulation and the current process allowed us to understand the origins of surface defects. Considering both the defects found in the first two stages of conformation and its influence on the rest of the manufacturing process, it was decided to perform an optimization study of these two roll forming stages. After an in-depth analysis, an action plan was proposed aiming to correct, mitigate or even eliminate the defects found. With a defined action plan, the reconceptual stage of the first two TIG 3 roll forming steps began. After implementing all the modifications, some simulations with this new conception were made and the results obtained were discussed in order to evaluate whether the action plan was effective or not.

Keywords: Welded roll forming pipe, numerical simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva Tensão x Deformação e propriedades mecânicas obtidas na direção longitudinal (direção de laminação).....	15
Figura 2- Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação (HELMAN, 1983)	18
Figura 3- Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação (CHIAVERINI, 1966)	19
Figura 4- Esquema do princípio do processo de laminação de tubos (BERTRANDIE, 1998).	21
Figura 5- Ilustração das etapas do processo de laminação de tubos (KIUCHI, 2006)....	22
Figura 6- Representação do processo de soldagem TIG [MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012].....	2
Figura 7- Representação do processo de soldagem à laser [MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012].....	3
Figura 8- Exemplo de flor de formação.....	3
Figura 9- Concentração da deformação na chapa metálica (BERTRANDIE, 1998).	4
Figura 10- Alongamento devido à torção resultando em deformação longitudinal (BERTRANDIE, 1998).	5
Figura 11- Origem dos fenômenos da flexão vertical (BERTRANDIE, 1998).	5
Figura 12- Diferentes trajetórias percorridas pelas fibras longitudinais da chapa (HALMOS, 1983).....	6
Figura 13- Ilustração das grandes etapas de laminação (HALMOS, 1983).	7
Figura 14- Descrição do ferramental utilizado pelas linhas TIG 3 e Laser 27	7
Figura 15- Exemplo da análise geométrica da chapa escaneada (Distribuição do raio de curvatura ao longo da chapa – TIG 3).....	10
Figura 16- Visão global das chapas TIG 3 e Laser 27 obtida através das digitalizações das chapas extraídas em campo (INOX 304L – 1.5 mm).....	10
Figura 17- Surgimento de zonas planas a partir da 2 ^a etapa de conformação da linha TIG 3.	11
Figura 18- Fenômeno de “esmagamento horizontal” do perfil observado na análise da flor de formação da linha TIG 3.....	12

Figura 19- Descrição do gráfico de análise dos raios de curvatura (Exemplo da chapa metálica retirada da linha Laser 27 durante o processo de lamination).	13
Figura 20- Surgimento das marcas na superfície externa do tubo durante uma das etapas de conformação.....	13
Figura 21- Esquema do princípio de surgimento das marcas nas superfícies dos tubos durante uma etapa de conformação.....	14
Figura 22- Exemplo do surgimento de marcas na superfície interna da chapa metálica nas zonas de perda de contato (4 ^a Etapa – Laser 27).	15
Figura 23- Exemplo do surgimento de marcas na superfície interna da chapa metálica nas zonas de transição plano-curva (1 ^a Etapa – TIG 3).....	15
Figura 24- Contato pontual entre a chapa metálica e os rolos das etapas guias (3 ^a Etapa – TIG 3).	16
Figura 25- Ilustração do modelo utilizado por COPRA FEA (Linha TIG 3).	18
Figura 26- Flor de formação da linha TIG 3 em simulação conforme regulagem da fábrica.	1
Figura 27- Heterogeneidade das propriedades mecânicas antes de entrar nas etapas com lâmina de pressão.	3
Figura 28- Correlação entre os defeitos visto na chapa metálica e as zonas de contato vistas na simulação (1 ^a e 2 ^a etapas).	4
Figura 29- Análise comparativa ao variar a distância entre os eixos dos rolos (1 ^a e 2 ^a etapas).	5
Figura 30- Defeito de conformação incompleta (2 ^a etapa).	6
Figura 31- Zonas de contato vistas em simulação (Etapas guias).	7
Figura 32- Defeitos de conformação incompleta das extremidades da chapa metálica (1 ^a etapa).	7
Figura 33- Comparação entre as concepções antiga e nova da 1 ^a etapa de conformação após suavizar a transição plano-curva.	9
Figura 34- Nova concepção da 2 ^a etapa de conformação conformando o fundo do tubo por inteiro; Comparação entre as concepções antiga e nova da 2 ^a etapa de conformação.....	10
Figura 35- Comparação entre as concepções antiga e nova da 1 ^a etapa de conformação após suavizar a transição plano-curva.	10

Figura 36- Comparaçao do perfil da chapa metálica pós 2 ^a etapa de conformação. (As setas representam os esforços de conformação realizados pelos rolos da 3 ^a etapa).	11
.....
Figura 37- Comparaçao entre as flores de formação nova e antiga.	12
Figura 38- Comparaçao entre o formato do perfil da chapa metálica após 2 ^a etapa de conformação, incluindo uma análise da distribuição da deformação plástica transversal no perfil.	13
Figura 39- Concentração de deformação longitudinal nas extremidades da chapa metálica.	14

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1.1. Aperam: um novo grupo na produção de aços inoxidáveis	12
1.1.1. <i>Produtos no mercado mundial</i>	12
1.1.2. <i>Produção de tubos com costura em Ancerville, França.....</i>	12
1.1.3. <i>Os centros de pesquisa da Aperam e da ArcelorMittal</i>	13
1.2. Objetivo do trabalho	13
1.2.1. <i>Contexto e objetivo</i>	13
1.2.2. <i>O aço inoxidável AISI 304L</i>	14
1.2.3. <i>Estratégia de abordagem do problema.....</i>	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Processos de conformação mecânica.....	16
2.1.1. <i>Classificação quanto ao tipo de esforço predominante</i>	17
2.1.2. <i>Classificação quanto à temperatura de trabalho.....</i>	18
2.2. Conceito da Laminação.....	19
2.3. Laminação de tubos com costura	21
2.3.1. <i>As grandes etapas do processo de laminação de tubos</i>	22
2.3.2. <i>Tipos de técnicas de solda mais utilizadas na produção de tubos laminados com costura</i>	22
2.3.3. <i>Laminação: algumas definições e fatores influentes</i>	3
2.3.4. <i>As duas estratégias estudadas/utilizadas pela planta de Ancerville</i>	7
DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA	9
3.1. Análise em campo do processo industrial de laminação de tubos	9
3.1.1. <i>Análise geométrica das chapas metálicas</i>	9
3.1.2. <i>Análise dos defeitos superficiais.....</i>	13
3.1.3. <i>Discussão dos resultados das análises</i>	16
3.2. Simulação por elementos finitos da linha TIG 3	17
3.2.1. <i>Os dados de entrada da simulação</i>	18
3.2.2. <i>Análise da flor de formação</i>	1
3.2.3. <i>Análise do nível de tensão e deformação do perfil do tubo</i>	2
3.2.4. <i>Correlação: Simulação vs Defeitos.....</i>	3
3.2.5. <i>Resumo conclusivo pós-análises e Plano de Ação</i>	8

3.3.	Redefinição da geometria dos rolos laminadores (1 ^a e 2 ^a etapas)	9
3.3.1.	<i>Transições plano-curva suaves</i>	9
3.3.2.	<i>Conformação completa do fundo do tubo</i>	9
3.3.3.	<i>Extremidades/arestas da chapa metálica</i>	10
3.3.4.	<i>Formato de chapa metálica compatível com a geometria dos rolos guias</i> 11	
RESULTADOS E DISCUSSÃO		12
4.1.	Análise da flor de formação.....	12
4.2.	Análise do formato perfil da chapa metálica após 2 ^a etapa.....	13
4.3.	Pontos de atenção sobre a nova concepção da linha TIG 3	14
CONCLUSÃO		15
5.1.	Trabalhos futuros	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		17

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho foi objeto de estudo de um estágio supervisionado realizado na empresa Aperam, localizada na França, durante intercâmbio estudantil. Serão discutidos alguns tópicos a seguir com o objetivo de apresentar a empresa e o contexto do estágio assim como explicar o objetivo da mesma em realizar tal projeto.

1.1. Aperam: um novo grupo na produção de aços inoxidáveis

A empresa Aperam foi criada a partir da separação da área de aços inoxidáveis do grupo ArcelorMittal. Atualmente, essa empresa é uma das principais produtoras de aços inoxidáveis e aços especiais assim como de aços para aplicações elétricas. Aperam tem uma capacidade de produção de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de aço inoxidável na Europa e no Brasil. Ela é a líder em se tratando da produção de ligas especiais de alto valor agregado. Essa empresa tem aproximadamente 9800 empregados distribuídos nas plantas localizadas no Brasil, Bélgica e na França.

1.1.1. Produtos no mercado mundial

Aperam desempenha um importante papel no mercado mundial atuando em vários setores industriais, como por exemplo: aeroespacial, automotivo, construção civil, elétrica e eletrônica, médico, de eletrodoméstica, etc. Atualmente, seus produtos são comercializados em mais de 40 países e são distribuídos em três categorias: *Stainless & Electrical Steel, Service & Solutions, Alloys & Specialties*.

1.1.2. Produção de tubos com costura em Ancerville, França

Aperam *Stainless Services and Solution Tubes Europe* instalada em Ancerville, na França, fornece tubos para vários lugares na Europa. Fundada há mais de 40 anos, a planta de Ancerville produz tubos para várias aplicações: transporte de

fluidos com tubos resistentes à corrosão; fins ornamentais; e fins estruturais na construção civil.

Atualmente, Aperam produz uma vasta gama de perfis com três opções de soldagem (TIG, laser ou soldagem por indução) utilizando principalmente o processo de laminação.

1.1.3. Os centros de pesquisa da Aperam e da ArcelorMittal

Com o objetivo de facilitar o desenvolvimento do trabalho, foi feita uma parceria entre o centro de pesquisa da Aperam de Isbergues, especialista na área de metalurgia dos aços inoxidáveis, e o centro de pesquisa da ArcelorMittal em Montataire, que possui engenheiros especialistas na área de laminação de tubos com costura.

O estágio teve sua base no centro de pesquisa da ArcelorMittal onde as etapas de análise e de simulação numérica do processo de laminação de tubos foram realizadas.

1.2. Objetivo do trabalho

1.2.1. Contexto e objetivo

O objetivo deste trabalho corresponde à otimização de um processo de fabricação de tubos laminados com costura destinados à aplicação alimentícia. As especificações dos tubos são as seguintes:

- Diâmetro: 40 mm;
- Espessura: 1,5 mm;
- Material: aço inoxidável AISI 304L.

A fim de se manter como uma forte concorrente no mercado mundial, a fábrica de Ancerville tem como visão principal modernizar suas linhas de laminação de tubos com o objetivo de otimizar o processo de fabricação de tubos através de melhorias relacionadas à qualidade dos tubos, tanto em termos de propriedades mecânicas quanto em termos de qualidade superficial.

Segundo a norma NF EM 10217-7 - 2015, que discute sobre as condições técnicas finais dos tubos com costura em aço inoxidável que trabalham sob pressão, os tubos não devem apresentar nenhum defeito superficial interno ou externo visível a olho nu. Porém é aceitável encontrar algumas pequenas marcas nos tubos, pois é muito difícil obter um tubo sem nenhuma marca utilizando o processo de lamação. Portanto, um dos objetivos é a diminuição das marcas observadas nos tubos produzidos.

Outro problema frequente no processo de lamação de tubos é a heterogeneidade das propriedades mecânicas ao longo da circunferência do tubo ao fim do processo. A causa desse fenômeno pode ser provocada por vários fatores: deformação localizada; conformação muito severa; fadiga de conformação (o tubo guarda seu histórico de deformação durante todo o processo); e conformação não progressiva ou abrupta. Por isso, o objetivo deste trabalho foi produzir um tubo com as propriedades mecânicas mais homogêneas possível.

1.2.2. O aço inoxidável AISI 304L

Conhecido como “INOX alimentício”, o aço inoxidável AISI 304L pertence à categoria dos aços inoxidáveis austeníticos. Esse aço apresenta as seguintes características:

- **Resistência à corrosão:** alta resistência quando exposto à atmosfera e aos ambientes químicos (ácidos e básicos) comuns da área alimentícia;
- **Boa conformabilidade:** a associação entre uma baixa tensão de escoamento e uma elevada capacidade de alongamento permite obter geometrias complexas quando conformado;
- **Boa soldabilidade:** levando em conta o baixo teor de carbono (AISI 304L, ‘L’ corresponde à expressão ‘*Low carbone content*’), esse aço tem uma boa soldabilidade quando comparado aos demais aços inoxidável.

Para caracterizar esse material, alguns ensaios de tração foram realizados retirando algumas amostras da chapa (na direção de lamação) após ser desenrolada da bobina e antes de entrar na laminadora, ou seja, na zona onde o material possui suas propriedades mecânicas de origem. Dessa forma, é possível se

obter as propriedades mecânicas e a curva tensão x deformação do material, a qual está representada na figura 1.

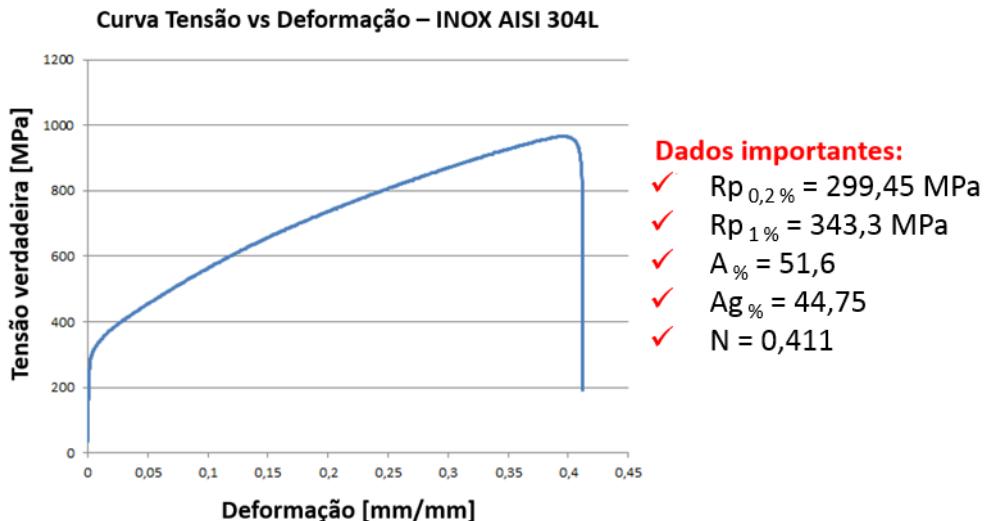


Figura 1 - Curva Tensão x Deformação e propriedades mecânicas obtidas na direção longitudinal (direção de laminação)

1.2.3. Estratégia de abordagem do problema

Uma estratégia de otimização foi colocada em prática a fim de facilitar o planejamento das etapas deste trabalho se baseando nos objetivos da fábrica da Aperam:

O trabalho foi dividido em três etapas:

- **Análise:** nesta etapa, uma análise do processo de fabricação de tubos foi realizada a fim de conhecer a situação real na qual o processo se encontrava;
- **Reflexão/discussão:** levando em conta as informações que concernem o processo de laminação, esta etapa teve como objetivo compreender os fenômenos observados a fim de propor possíveis causas para os problemas;
- **Otimização:** esta etapa visa propor algumas alternativas de otimização do processo com a ajuda da simulação numérica e validar seus resultados através dos ensaios experimentais na planta da fábrica.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processos de conformação mecânica

Entende-se como conformação dos metais a modificação de um corpo metálico para outra forma definida.

Os processos de conformação podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma estão relacionadas com altas temperaturas.

Os processos mecânicos são constituídos pelos processos de conformação plásticas, para os quais as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à ruptura do material, e pelos processos de conformação por usinagem, para os quais as tensões aplicadas são sempre superiores ao limite mencionado, sendo a forma final, portanto, obtida por retirada de material.

É importante o estudo dos processos de conformação plástica dos metais porque mais de 80 % de todos os produtos metálicos produzidos são submetidos, em um ou mais estágios, a tais processos.

Os processos de conformação plástica dos metais permitem a obtenção de peças no estado sólido, com características controladas, através da aplicação de esforços mecânicos em corpos metálicos iniciais que mantêm o seu volume constante. De uma forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com especificações de:

- Dimensão e forma;
- Propriedades mecânicas;
- Condições superficiais;

conciliando a qualidade com elevadas velocidades de produção e baixos custos de fabricação.

Os processos de conformação plásticas podem ser classificados de acordo com vários critérios:

- Esforço predominante;
- Temperatura de trabalho;
- Quanto à forma do material trabalhado ou do produto final;
- Quanto ao tamanho da região de deformação (localizada ou geral);
- Quanto ao tipo de fluxo do material (estacionário ou intermitente);
- Quanto ao tipo de produto obtido (semi-acabado ou acabado).

2.1.1. Classificação quanto ao tipo de esforço predominante

Os processos de conformação plástica podem ser classificados, de acordo com o tipo de esforço predominante em (figura 2):

- **Conformação por compressão direta:** solicitação externa por compressão sobre a peça de trabalho. Ex: forjamento (livre e em matriz); e laminação (plana e de perfis);
- **Conformação por compressão indireta:** as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como de compressão, mas as que efetivamente provocam a conformação plástica do metal são de compressão indireta, desenvolvidas pela reação da matriz sobre a peça. Ex: trefilação e extrusão; e estampagem (embutimento).
- **Conformação por tração:** é o estiramento de chapas, em que a peça toma a forma da matriz através da aplicação de forças de tração em suas extremidades.
- **Conformação por cisalhamento:** envolvem forças cisalhantes suficientes ou não para romper o metal no seu plano de cisalhamento. Ex: torção de barras; e o corte de chapas.
- **Conformação por flexão:** as modificações de forma são obtidas mediante a aplicação de um momento fletor. Esse princípio é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos. Ex: dobramento livre, de borda e de matriz; e calandragem.

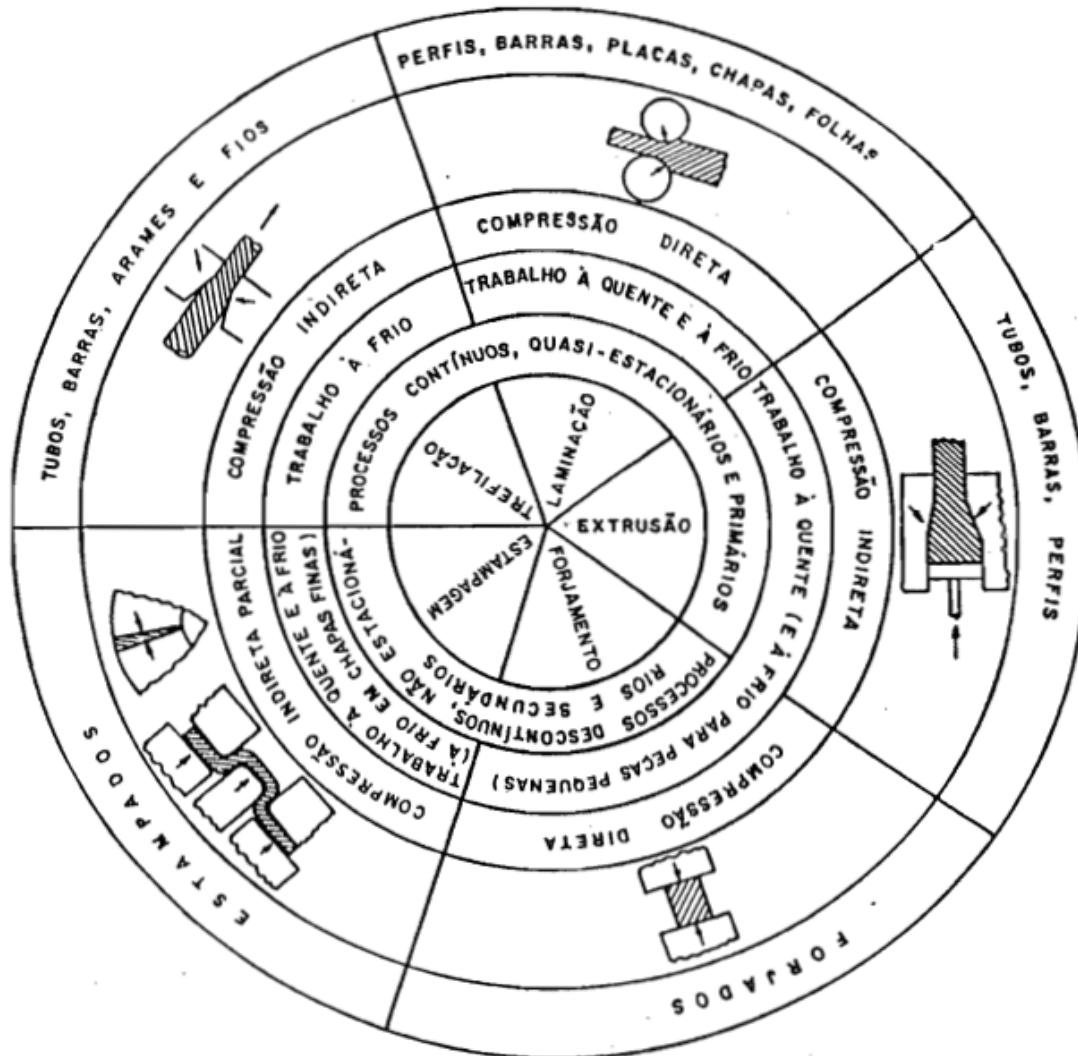


Figura 2- Esquema simplificado da classificação dos processos de conformação (HELMAN, 1983)

2.1.2. Classificação quanto à temperatura de trabalho

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio e com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior que a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é designado como de trabalho a quente e, abaixo dessa temperatura, é designado como de trabalho a frio.

No trabalho mecânico a frio, provoca-se o aparecimento no metal do chamado efeito de encruamento, ou seja, o aumento da resistência mecânica com a deformação plástica. O trabalho mecânico a frio permite aumentar a resistência

mecânica de certos metais não-ferrosos que não são endurecíveis por tratamentos térmicos.

No trabalho mecânico a quente, a deformação plástica é realizada numa faixa de temperatura, e durante um determinado tempo, em que o encruamento é eliminado pela recristalização do metal.

Um metal na sua condição encruada possui energia interna elevada em relação ao metal não-deformado plasticamente. Aumentando-se a temperatura, há uma tendência do metal retornar à condição mais estável de menor energia interna. O tratamento térmico para obter esse efeito é denominado recozimento e, além da recuperação da estrutura cristalina do metal, este tratamento provoca a diminuição da resistência mecânica e a elevação da ductilidade.

2.2. Conceito da Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (figura 3). Desta forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior do que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. Para se obter, então, uma determinada dimensão (espessura) do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos passes através dos cilindros, com as distâncias entre si decrescentes.

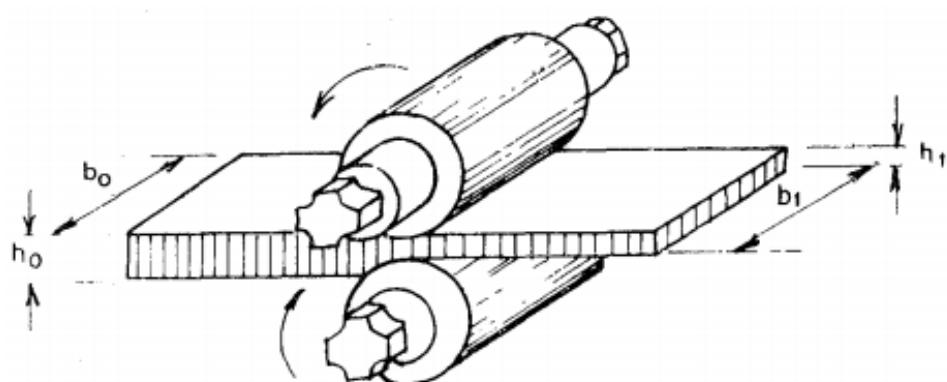


Figura 3- Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação (CHIAVERINI, 1966)

A passagem da peça pelos cilindros ocorre através da ação da força de atrito que atua na superfície de contato entre as peças e os cilindros. Essa força é proporcional ao coeficiente de atrito entre peça e cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez, resulta da resistência à deformação plástica do material da peça nas condições de processamento (temperatura e velocidade de trabalho).

O processo de laminação pode ser conduzido a frio ou a quente, dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça especificada para o início e final do processamento.

– **Laminação a quente:** a peça inicial é comumente um lingote fundido, ou uma placa ou tarugo; a peça intermediária e final assumem, após diversos passes pelos cilindros laminadores, as formas de perfis diversos (produto não planos) ou de placas e chapas (produtos planos). A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes. A laminação a quente, portanto, comumente se aplica em operação iniciais (operação de desbaste), onde são necessárias grandes reduções de secções transversais.

– **Laminação a frio:** a peça inicial para o processamento, nesse caso, é um produto semi-acabado (chapa), previamente laminado a quente. Como a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de secção transversal. Um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, pode se tornar necessário em função do programa de redução estabelecido e das propriedades exigidas do produto final. A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (operações de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior (obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos) e de estrutura do metal encruada com ou sem recozimento final.

A sequência e o número de etapas de laminação dependem das condições iniciais da peça (forma e natureza) e das condições finais especificadas (dimensões, formas, acabamento superficial, propriedades mecânicas e metalúrgicas).

2.3. Laminação de tubos com costura

A laminação de tubos é um processo contínuo de conformação mecânica a frio que parte de um metal em chapa ou em bobinas. Ela permite produzir perfis metálicos, em geral, com elevada razão de aspecto, com secções essencialmente constantes, tais como representado na figura 4. Esse método de conformação mecânica possui as seguintes características: alta flexibilidade geométrica do perfil; alta produtividade; eficiência na conformação de materiais com alta resistência mecânica.

Tecnicamente, a chapa de metal, se encontra embutida entre uma sequência de rolos laminadores em pares que a deformam progressivamente até a obtenção da forma final desejada. É importante dizer que as variações de espessura são mínimas como resultado de um baixo nível de deformação global.

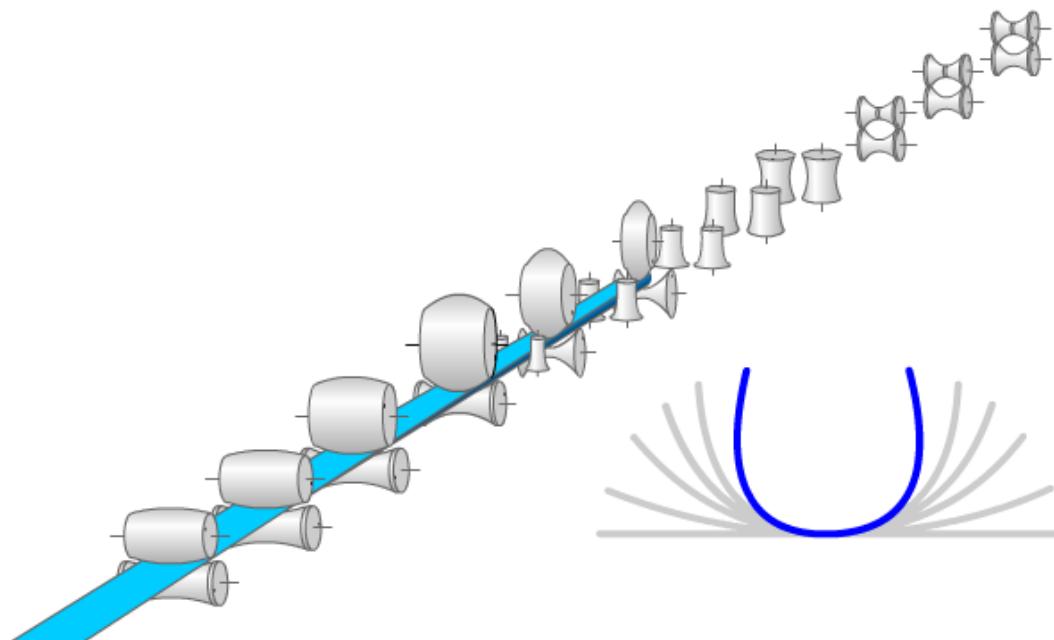


Figura 4- Esquema do princípio do processo de laminação de tubos (BERTRANDIE, 1998).

2.3.1. As grandes etapas do processo de laminação de tubos

O processo de laminação de tubos é composto por três etapas principais (figura 5):

1. Laminação: etapa onde a chapa metálica é conformada pelos rolos laminadores até atingir uma geometria próxima àquela desejada. Os rolos laminadores são responsáveis por impor a sua forma na chapa metálica;

2. Preparação das extremidades para a soldagem: uma vez o tubo conformado, deve-se posicionar as extremidades da chapa de metal para que elas estejam alinhadas e paralelas. Feito isso, elas serão comprimidas uma contra a outra e, então, soldadas;

3. Calibração: nesta etapa, o tubo passa por vários rolos laminadores a fim de se eliminar possíveis defeitos geométricos e também para minimizar o desvio de circularidade do produto final.

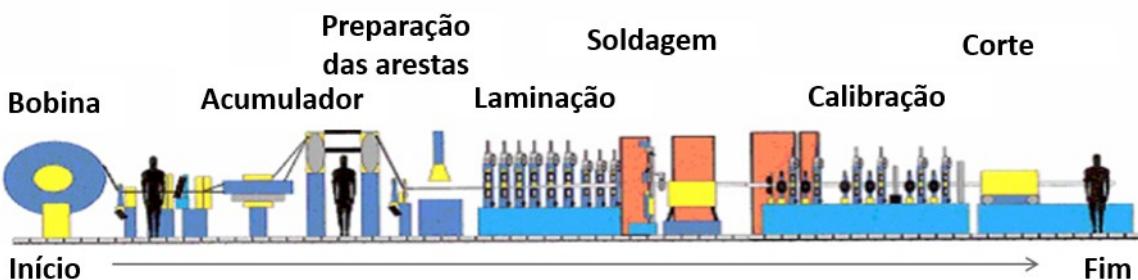


Figura 5- Ilustração das etapas do processo de laminação de tubos (KIUCHI, 2006).

2.3.2. Tipos de técnicas de solda mais utilizadas na produção de tubos laminados com costura

Segundo a definição da AWS (American Welding Society) “soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais, produzidos por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição” [WELDING HANDBOOK COMMITTEE].

Basicamente, os processos de soldagem são divididos em duas grandes classes:

- **Processos de soldagem por pressão:** se baseiam na aplicação de pressões elevadas de forma a deformar plasticamente as superfícies metálicas permitindo a aproximação atômica a distâncias da ordem de r_0 . Em geral, as peças são aquecidas localmente para facilitar a sua deformação;
- **Processos de soldagem por fusão:** consistem na aplicação localizada de calor na região de união para a sua fusão e do metal de adição (quando este for utilizado), produzindo a ligação pela solidificação do metal fundido e, portanto, a destruição das interfaces. Devido ao grande número de processos de soldagem por fusão, estes são normalmente separados em subgrupos.

Em se tratando de soldagem de tubos com costura, os processos de soldagem mais utilizados são os processos TIG e à laser, ambos são processos de soldagem por fusão. Abaixo tais processos de soldagem serão conceituados e discutidos:

- **TIG (*Tungsten Inert Gas*):** é um processo no qual a coalescência 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 (Ar e He). Metal de adição pode ser utilizado ou não. A figura 6 mostra esquematicamente o processo. A soldagem TIG pode ser manual ou mecanizada. O processo TIG é considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco. O equipamento básico do processo consiste de fonte de energia (de CC para a maioria das ligas metálicas), tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção e um sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência). Dentre as vantagens deste tipo de soldagem pode-se citar: excelente controle da poça de fusão; produz solda de alta qualidade e excelente acabamento; gera pouco ou nenhum respingo; exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem. Dentre as limitações deste processo pode-se citar: velocidade de avanço da tocha baixa (produtividade baixa); e custo de consumíveis e equipamento relativamente elevados. Este tipo de soldagem é aplicado em: soldagem de precisão ou de elevada qualidade; soldagem de peças de pequena espessura; e tubulações de pequeno diâmetro;

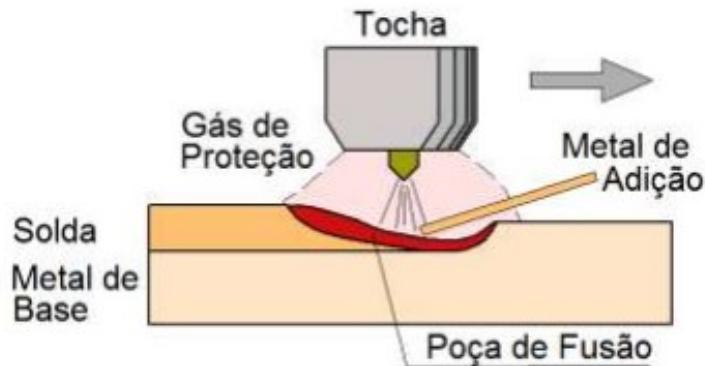


Figura 6- Representação do processo de soldagem TIG [MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012].

– **Soldagem à laser ou LBW (*Laser Beam Welding*)**: 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 (figura 7). Este feixe de alta intensidade é suficiente para fundir vaporizar parte do material da junta no ponto de entrada do feixe no material, que penetra profundamente no metal de base. A soldagem a laser apresenta as seguintes características favoráveis: não ocorre a geração de raios X; feixe de laser pode ser facilmente direcionado e focalizado o que facilita a automação do processo; devido à menor intensidade do feixe de laser a poça de fusão deste processo é menos sensível a problemas de instabilidade (porosidade na raiz, fusão incompleta, respingos e sob o cordão, etc); processo de alta velocidade, ideal para aplicações automatizadas. Dentre as limitações deste processo pode-se citar: custo elevado do equipamento; baixa eficiência térmica, necessitando de grandes unidades de refrigeração para aplicações de alta potência. Esse processo é mais aplicado na soldagem de peças de menos espessura com uma elevada velocidade de deslocamento.

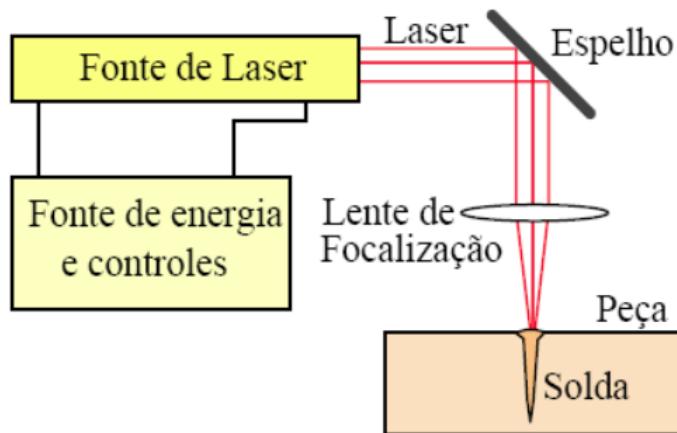


Figura 7- Representação do processo de soldagem à laser [MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012].

2.3.3. Laminação: algumas definições e fatores influentes

Durante a etapa de laminação, a chapa metálica sofre uma operação de conformação mecânica. Um fator muito importante para analisar a sequência de conformação é chamado flor de formação (figura 8). Essa ferramenta de análise corresponde à superposição de vários perfis da chapa metálica ao longo do processo de conformação.

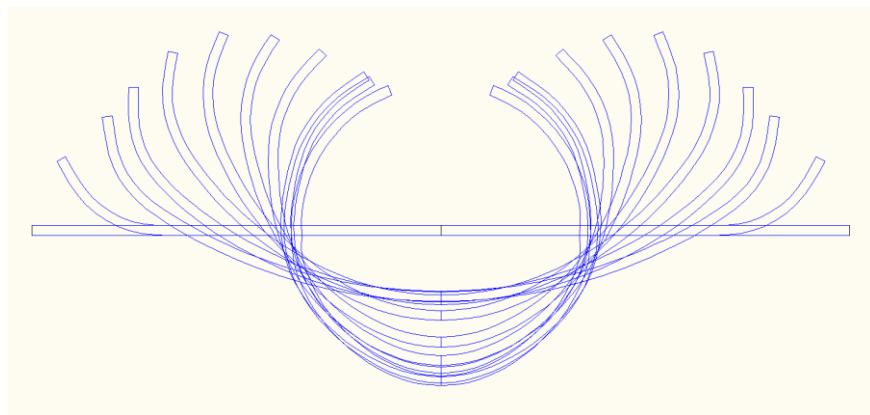


Figura 8- Exemplo de flor de formação.

Na laminação de tubos, vários modos de deformação irão aparecer e podem impactar na qualidade final dos tubos. Certos modos são favoráveis, ao passo que outros são parasitas. Alguns desses modelos serão mencionados logo abaixo:

Durante o processo de conformação mecânica, a chapa metálica sofre uma deformação plástica localizada na direção transversal. O nível de deformação

plástica induzido está relacionado principalmente à geometria do perfil de tubo desejada. A deformação transversal é um fator que mais influenciará as propriedades mecânicas do tubo no final do processo. Em se tratando de laminção de tubos, as deformações de engenharia pedem ser aproximadas pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{e}{2R} \quad (1)$$

Onde:

- e corresponde à espessura da chapa metálica;
- R corresponde ao raio de curvatura da fibra neutra.

Na laminadora, a chapa sofre, essencialmente, conformação mecânica ao se aproximar dos rolos, mas principalmente ao entrar em contato com os rolos laminadores, como é ilustrado na figura 9. Não obstante, outras deformações parasitas inerentes ao processo de laminção de tubos podem ser geradas através de dois fenômenos: torção (figura 10) e a flexão vertical (figura 11) da chapa metálica (BERTRANDIE, 1998).

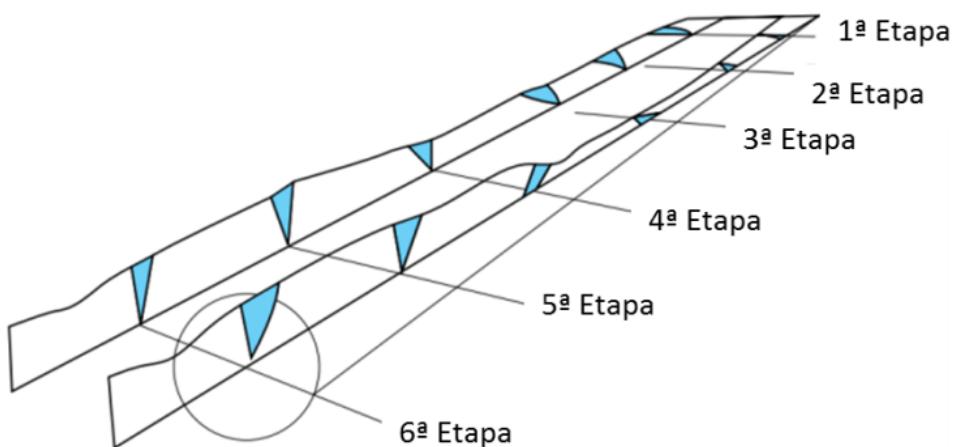


Figura 9- Concentração da deformação na chapa metálica (BERTRANDIE, 1998).

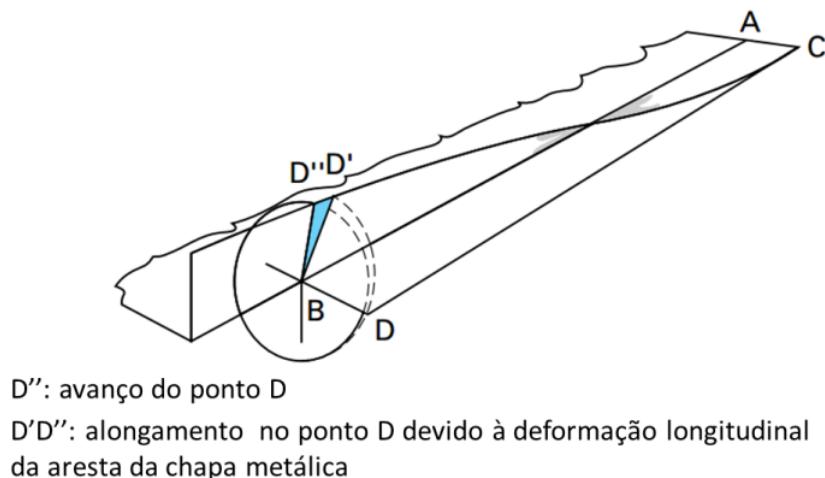


Figura 10- Alongamento devido à torção resultando em deformação longitudinal (BERTRANDIE, 1998).

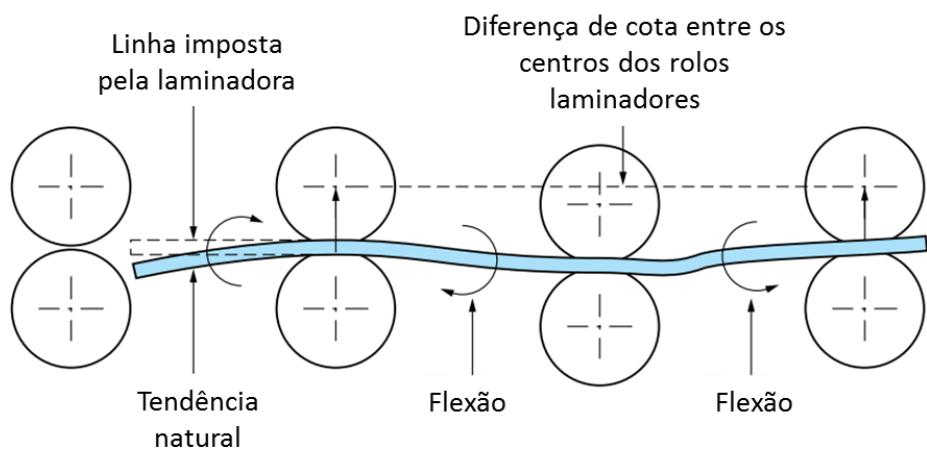


Figura 11- Origem dos fenômenos da flexão vertical (BERTRANDIE, 1998).

No momento da entrada da chapa entre um par de rolos de laminação, ou seja, em uma etapa de laminação, cada fibra localizada ao longo do plano transversal da chapa sofrerá um alongamento diferente, ou seja, percorrerá um caminho diferente (figura 12). Essa diferença do alongamento introduzirá deformações parasitas que podem dar origem à defeitos no processo de conformação mecânica.

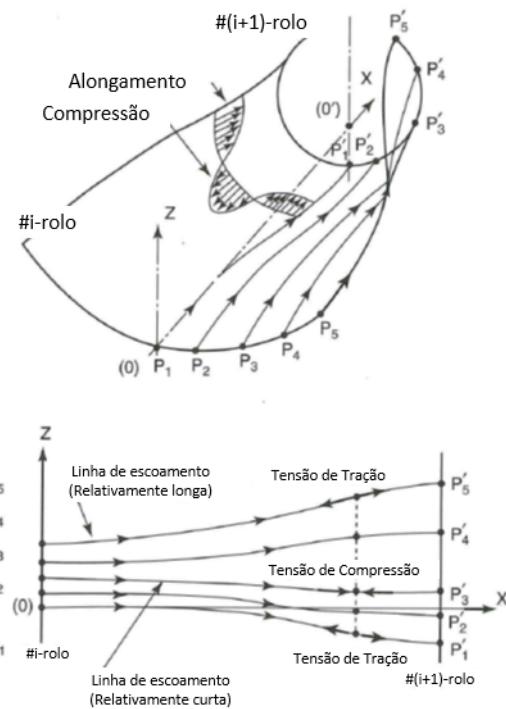


Figura 12- Diferentes trajetórias percorridas pelas fibras longitudinais da chapa (HALMOS, 1983).

As etapas de conformação podem se diferenciar quanto à geometria e disposição dos rolos laminadores. A seguir são definidos os três tipos principais (figura 13):

– **Etapa laminadora:** Etapa constituída por rolos laminadores horizontais que impõem a sua forma na chapa por ambos os lados, externo e interno. Dessa forma, o processo de conformação é mais preciso visto que a deformação se dá de uma forma mais controlável e definida;

– **Etapa guia:** Nesta etapa, os rolos laminadores verticais têm como objetivo guiar a chapa metálica para a próxima etapa de conformação. Ao longo dessa etapa, a chapa pode ser deformada plasticamente, porém, essa deformação deixa de ser controlada e bem definida haja visto que não há um contra-corpo pois os rolos só tocam a superfície externa do tubo.

– **Etapa com lâmina de pressão:** Esta etapa tem por objetivo aproximar as arestas da chapa a fim de preparar o tubo para a etapa de soldagem. Uma lâmina (seção intermediária do rolo laminador superior) é posta entre as duas arestas da

chapa de forma a guiá-las ao final do processo paralelas e alinhadas. A espessura dessa lâmina vai diminuindo ao longo das etapas, a fim de aproximar cada vez mais as duas extremidades do tubo preparando-as para o processo de soldagem.

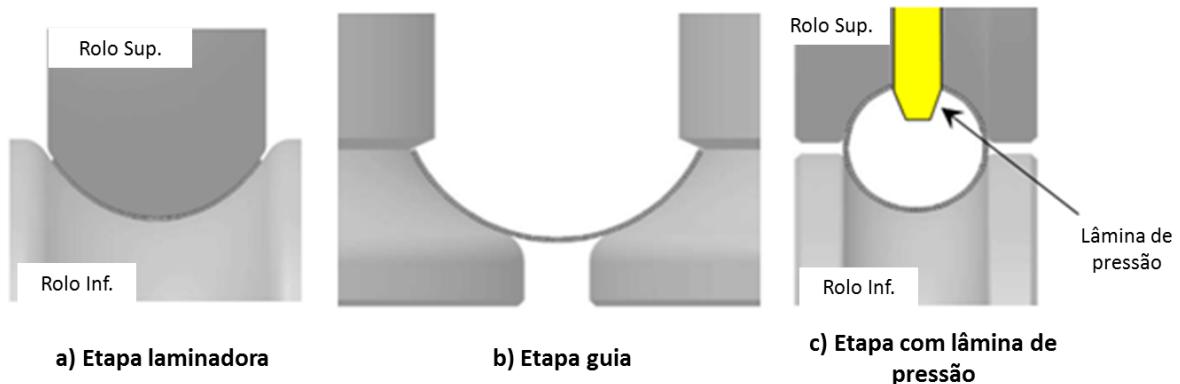


Figura 13- Ilustração das grandes etapas de laminado (HALMOS, 1983).

2.3.4. As duas estratégias estudadas/utilizadas pela planta de Ancerville

A fábrica de tubos da Aperam em Ancerville utiliza duas estratégias diferentes de laminado para produzir os tubos mencionados na secção 1.2.1. Essas duas estratégias se distinguem quanto ao processo de soldagem utilizado (TIG ou Laser) e também quanto à idade de cada uma das linhas: aquela que utiliza a técnica de soldagem a laser (Laser 27) é a mais nova. A figura 14 descreve o ferramental utilizado por cada uma das estratégias até as etapas com lâminas de pressão, etapas essas que são bastante similares nas duas concepções.

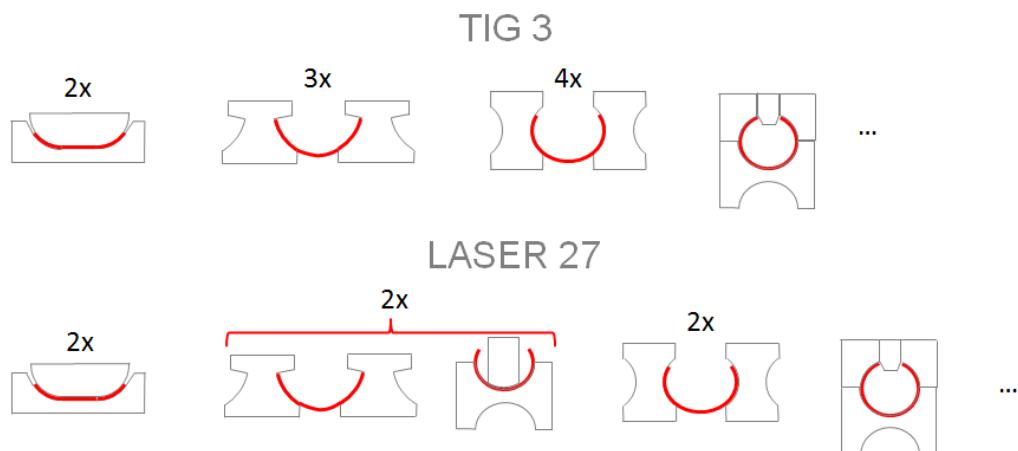


Figura 14- Descrição do ferramental utilizado pelas linhas TIG 3 e Laser 27.

Como se pode observar pela figura anterior, as duas linhas não se distinguem apenas pelo processo de soldagem. A principal disparidade observada corresponde ao tipo de estratégia de conformação adotado por cada uma das linhas. Enquanto a linha TIG 3 tem somente duas etapas laminadoras seguidas de 7 etapas guias, a linha Laser 27 apresenta uma alternância interessante entre as etapas laminadoras e as etapas guias. Essa diferença impactará na forma como a chapa se deformará.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

3.1. Análise em campo do processo industrial de laminação de tubos

Inicialmente, uma análise do processo industrial foi realizada a fim de melhor conhecer o estado atual das linhas em estudo. Para isso, em um primeiro momento, a fábrica de Ancerville desligou o maquinário e retirou uma chapa metálica de cada linha durante a produção do mesmo material e com a mesma espessura inicial (304L/1,5 mm de espessura). Em seguida, a fim de permitir um estudo fiel e coerente das linhas de laminação utilizando ferramentas computacionais, os desenhos técnicos e informações sobre a regulagem das laminadoras foram reunidos.

3.1.1. Análise geométrica das chapas metálicas

As chapas metálicas extraídas foram escaneadas utilizando de um scanner ótico tridimensional que permite medir precisamente a forma geométrica de cada chapa. Os dados assim coletados puderam ser utilizados para construir imagens computacionais em 3D das chapas. Tais imagens, chamadas de digitalizações, foram obtidas através de malhas computacionais que permitem a realização de uma análise geométrica das chapas metálicas. Na figura 15, é possível ver um exemplo de uma análise da distribuição do raio de curvatura ao longo da chapa durante o processo de laminação de tubos. Importante dizer que essas digitalizações não levam em conta o retorno elástico, somente a deformação plástica foi analisada nessa etapa.

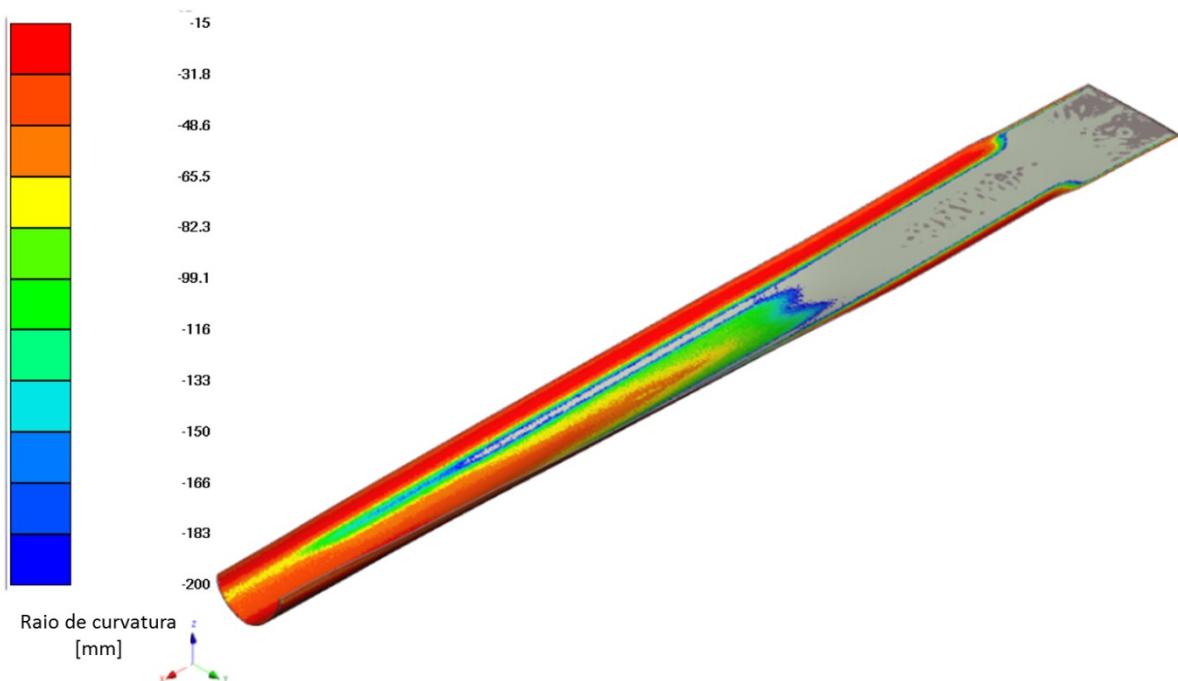


Figura 15- Exemplo da análise geométrica da chapa escaneada (Distribuição do raio de curvatura ao longo da chapa – TIG 3).

A partir das digitalizações, uma etapa de análise geométrica foi efetuada com o objetivo de verificar a evolução da forma que a chapa toma em cada etapa de laminação segundo as duas estratégias, Laser 27 e TIG 3. A figura 16 mostra uma visão global das chapas indicando as secções transversais correspondentes às primeiras etapas de laminação.

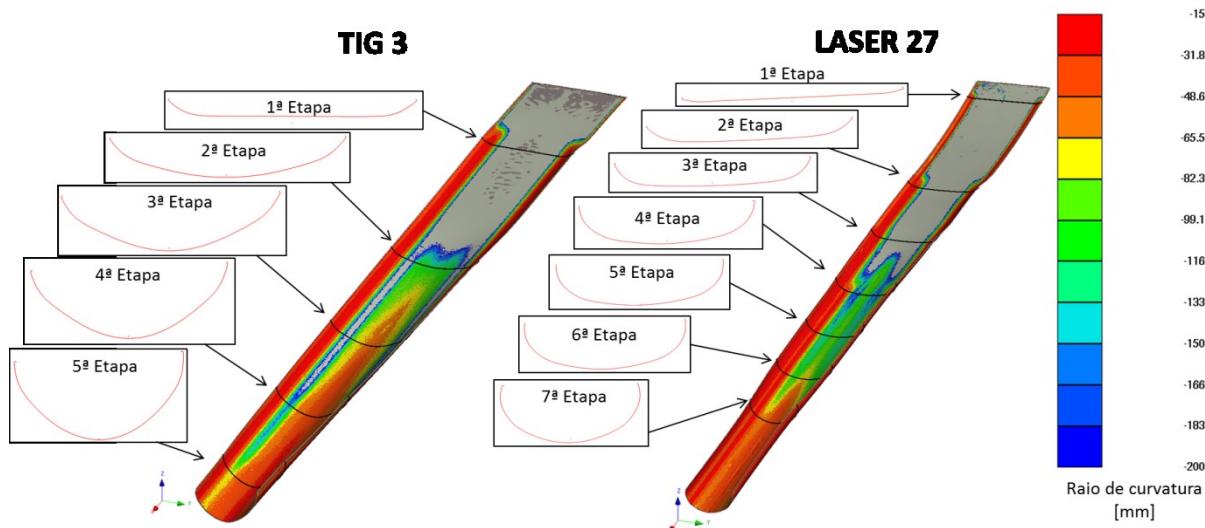


Figura 16- Visão global das chapas TIG 3 e Laser 27 obtida através das digitalizações das chapas extraídas em campo (INOX 304L – 1.5 mm).

Através dessa comparação é possível observar a grande disparidade de forma que a chapa toma em cada caso. Enquanto que a linha Laser 27 promove uma deformação da chapa de uma forma mais progressiva e homogênea, a linha TIG 3 induz uma deformação concentrada no fundo do tubo, dando a chapa um formato de "V". Esse fenômeno é claramente visível nas etapas 3, 4 e 5. Essa forma particular em "V" pode ser explicada pelo surgimento de um fenômeno chamado nesse trabalho de "esmagamento horizontal" ocasionado pelos rolos laminadores das etapas guias.

Como explicado na Secção 2.3.4, a linha TIG 3 possui uma sequência de sete etapas guias após a segunda etapa de conformação. Sabendo que nas etapas guias não há um contra-corpo impondo um formato circular na superfície interna do tubo, a chapa metálica se deforma livremente e toma um formato mais conveniente a ela, visto que os rolos laminadores promovem a deformação tocando apenas na superfície externa do tubo. Um outro fator determinante para o aparecimento desse fenômeno é o surgimento de zonas planas a partir da 2^a etapa de conformação. Essa zonas planas aparecem devido a conformação incompleta do fundo do tubo (figura 17). Em um caso ideal, a 2^a etapa de conformação deveria conformar o fundo do tubo de modo a evitar zonas planas.

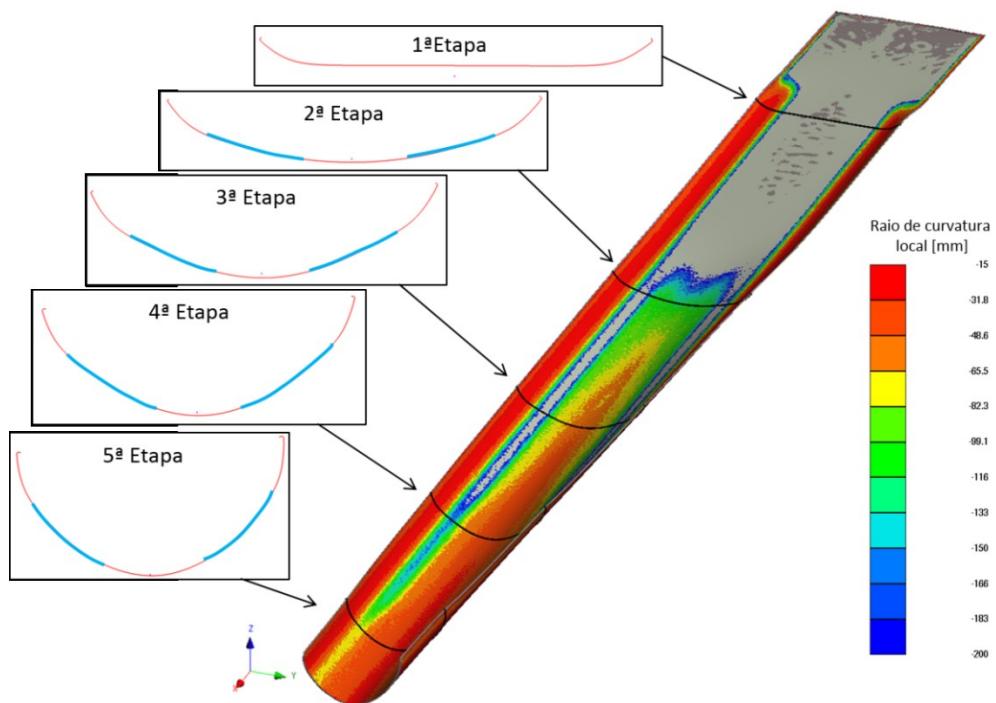


Figura 17- Surgimento de zonas planas a partir da 2^a etapa de conformação da linha TIG 3.

Como o fundo do tubo não está completamente conformado, se originará uma concentração de tensão nesse mesmo local. A figura 18 mostra como o fenômeno de esmagamento horizontal do perfil se desenvolve. Por causa dessa concentração de tensão induzida, as tubulações produzidas pela linha TIG 3 não possuem uma boa homogeneidade das propriedades mecânicas ao longo da sua circunferência. Além disso, devido ao formato em "V", a chapa não terá uma boa compatibilidade geométrica com as etapas seguintes de conformação e, como consequência direta, o contato entre a chapa e os rolos se tornará cada vez mais pontual.

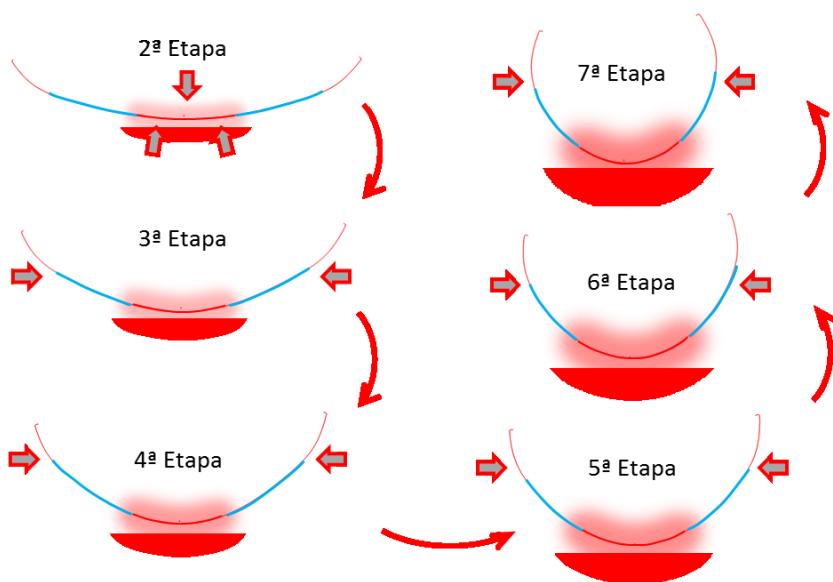


Figura 18- Fenômeno de “esmagamento horizontal” do perfil observado na análise da flor de formação da linha TIG 3.

Outro parâmetro estudado foi a distribuição dos raios de curvatura ao longo de cada etapa de conformação. Para isso, os raios de curvatura, assim como seus comprimentos de arco, foram medidos com auxílio do software ARE desenvolvido na própria ArcelorMittal. O conjunto de medidas foi introduzido em gráficos, como mostra a figura 19, de forma a se observar a evolução do processo de conformação mecânica em cada caso. Cada ponto do gráfico corresponde ao valor de raio de curvatura médio para uma porção da chapa ao longo da sua circunferência. Esse gráfico será utilizado mais tarde para fazer uma correlação entre os defeitos superficiais observados na chapa metálica e a geometria dos rolos laminadores.

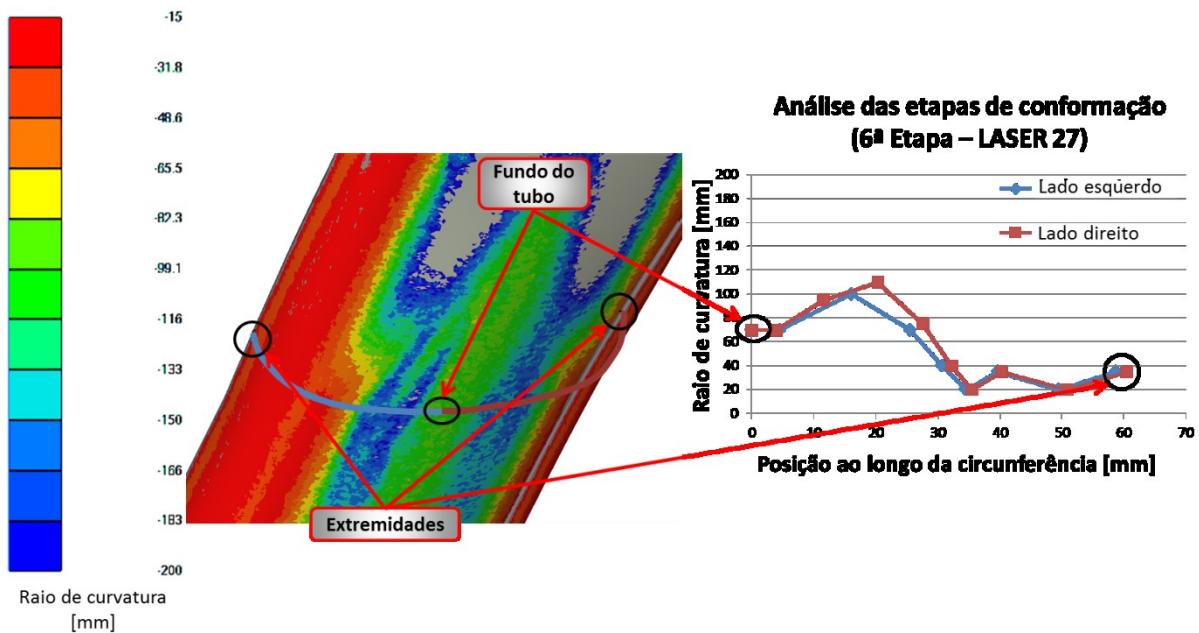


Figura 19- Descrição do gráfico de análise dos raios de curvatura (Exemplo da chapa metálica retirada da linha Laser 27 durante o processo de laminação).

3.1.2. Análise dos defeitos superficiais

Na etapa de conformação mecânica os rolos laminadores impõem sua forma geométrica na chapa metálica que, em função da severidade e do tipo de contato criado, pode ser marcada e, portanto, impactar a qualidade superficial do tubo (figura 20).



Figura 20- Surgimento das marcas na superfície externa do tubo durante uma das etapas de conformação.

Antes de começar a realizar a análise dos defeitos superficiais, um esquema (figura 21) foi desenvolvido com o objetivo de compreender o surgimento desses defeitos.

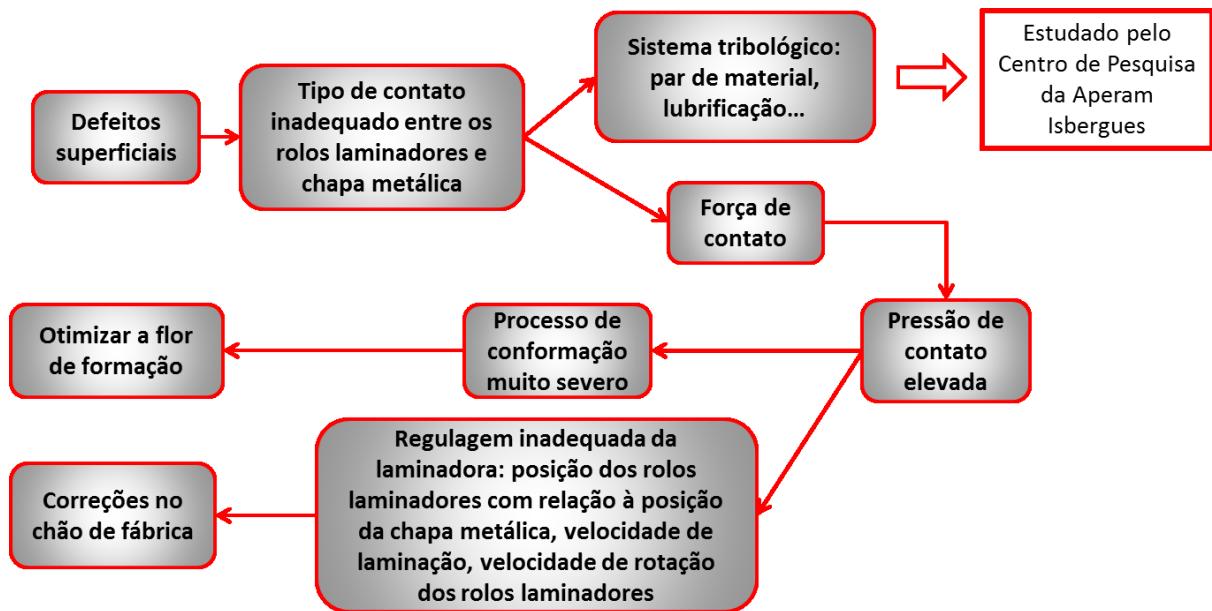


Figura 21- Esquema do princípio de surgimento das marcas nas superfícies dos tubos durante uma etapa de conformação.

Em uma viagem ao Centro de pesquisa da Aperam em Isbergues onde se encontravam as chapas metálicas retiradas das linhas, um processo de identificação e de análise dos defeitos superficiais foi realizado. Os defeitos superficiais nas chapas foram cartografados com o objetivo de conhecer a posição de cada um ao longo da circunferência do tubo.

Após ter feito uma correlação entre os defeitos e as geometrias dos rolos laminadores, algumas observações e suposições foram feitas e são listadas abaixo:

- Etapas laminadoras (TIG 3 e Laser 27):** a maior parte das marcas que aparecem nessas etapas tem origem nas zonas onde a chapa perde contato com os rolos superiores. Na figura 22, é possível observar esse fenômeno e sua relação com a geometria do rolo laminador superior.

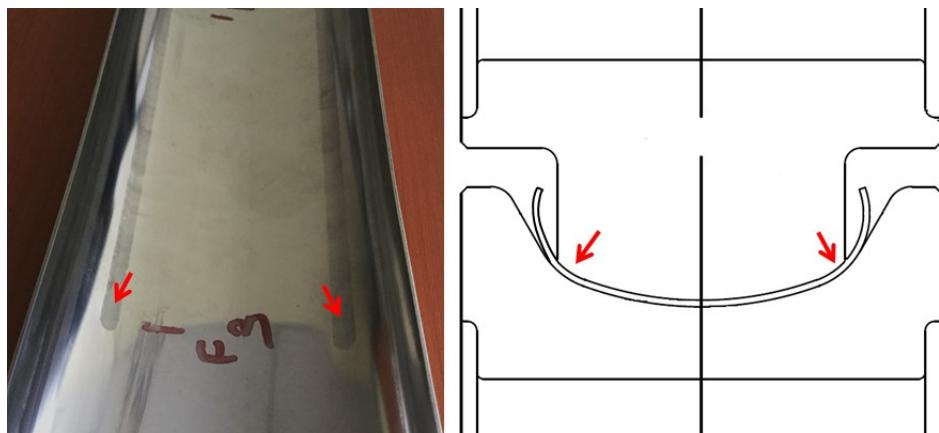


Figura 22- Exemplo do surgimento de marcas na superfície interna da chapa metálica nas zonas de perda de contato (4^a Etapa – Laser 27).

Outro tipo de defeito constatado é encontrado nas zonas de transição plano-curva. Essa observação é ilustrada pela figura 23 com auxílio de uma correlação entre a digitalização 3D da chapa metálica e o gráfico de distribuição dos raios de curvatura ao longo da largura da chapa.

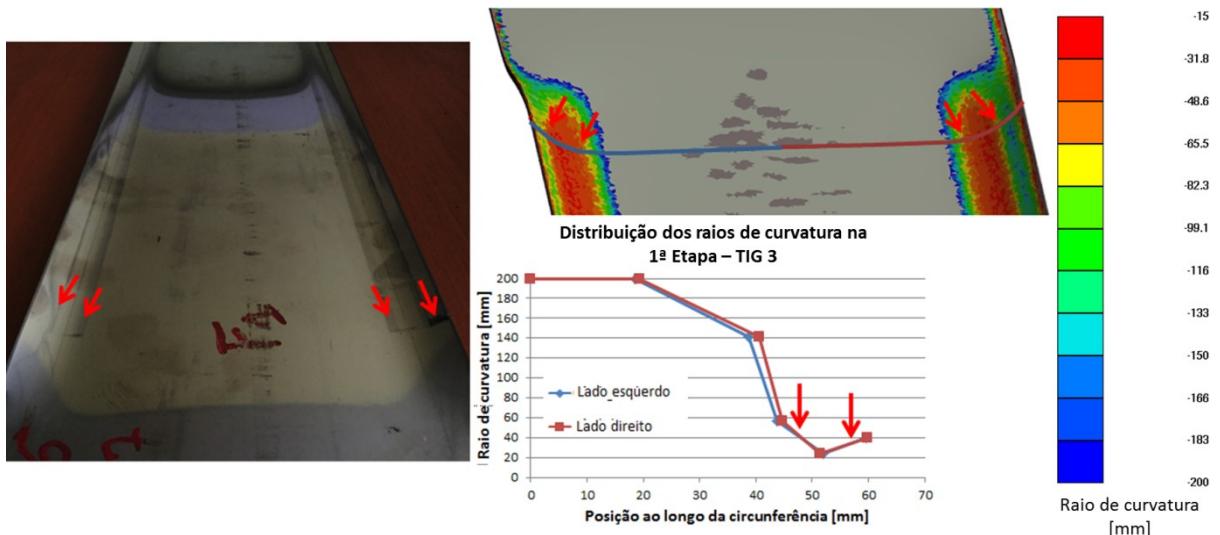


Figura 23- Exemplo do surgimento de marcas na superfície interna da chapa metálica nas zonas de transição plano-curva (1^a Etapa – TIG 3).

– Etapas guias (TIG 3 e Laser 27): as outras marcas tem seu surgimento quase em sua totalidade nas etapas guias. Esses defeitos aparecem porque a chapa metálica não tem uma compatibilização geométrica com os rolos laminadores, ou

seja, os rolos não tocam toda a superfície da chapa. Dessa forma, o contato entre a chapa e os rolos se torna pontual (figura 24).

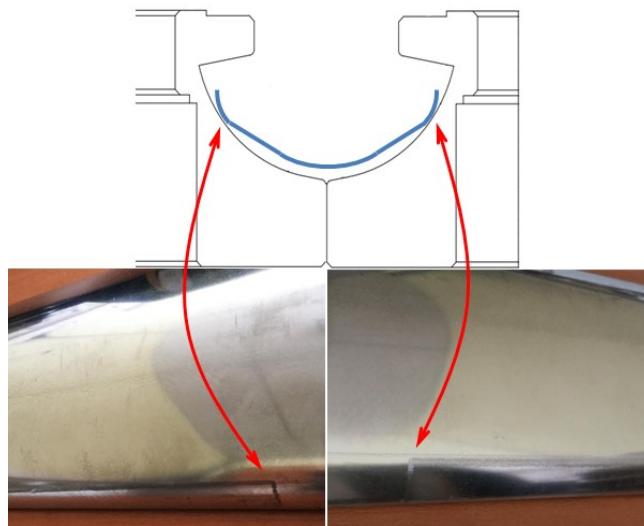


Figura 24- Contato pontual entre a chapa metálica e os rolos das etapas guias (3^a Etapa – TIG 3).

3.1.3. Discussão dos resultados das análises

A partir das análises geométricas das chapas metálicas e dos defeitos superficiais, pode-se concluir que:

- A linha Laser 17 promove a conformação da chapa de maneira mais progressiva, ao passo que a linha TIG 3 é passível de melhorias. Dessa forma, o tubo produzido pela linha TIG 3 tem mais chance de se apresentar com uma distribuição heterogênea das propriedades mecânicas no fim do processo;
- Na linha TIG 3 apresenta-se uma concentração de tensão no fundo do tubo podendo impactar as propriedades mecânicas finais do tubo.

Mesmo com as duas linhas apresentando defeitos, o investimento destinado na otimização das mesmas não era suficiente para intervir nas duas linhas. Dessa forma e tendo em conta as observações citadas acima, os estudos foram voltados para a otimização da linha que se apresentava com mais defeitos, ou seja, a linha TIG 3.

3.2. Simulação por elementos finitos da linha TIG 3

A simulação por elementos finitos consiste em uma tentativa de reproduzir os fenômenos físicos a partir de equações matemáticas e físicas que regem esses fenômenos. O objetivo principal é modelar o processo de laminação de tubos da linha TIG 3 semelhante ao processo real para que se possa compreender o que realmente acontece na realidade (veja figura 25). As equações diferenciais que governam os fenômenos físicos são aplicadas aos nós da malha numérica com auxílio das condições limites e de contorno identificadas no processo. Esse procedimento é, em seguida, repercutido para todos os demais nós pertencentes à malha numérica do objeto em análise. Quanto mais fina for a malha numérica, mais precisos serão os resultados da simulação.

Portanto, visando ter uma noção mais detalhada do processo para, finalmente, propor algumas pistas de melhorias concretas, a etapa de simulação numérica foi lançada. Para isso, o software comercial COPRA FEA assim como o seu pacote analítico COPRA RF, foram utilizados.

Na figura 20, é possível visualizar o modelo utilizado em COPRA FEA. Nesse modelo, uma velocidade constante foi imposta nas extremidades da chapa. Importante dizer que o atrito entre a chapa e os rolos laminadores não é levado em conta, ou seja, a chapa desliza livremente durante sua passagem entre os rolos ($\mu=0$). Mesmo que os aspectos de contato sejam importantes no estudo dos defeitos superficiais, essa simulação não leva em conta os problemas envolvendo o sistema tribológico que poderão ser estudados em um projeto futuro. Por sua vez, essa simulação irá permitir o estudo dos defeitos superficiais através da análise da pressão de contato normal.

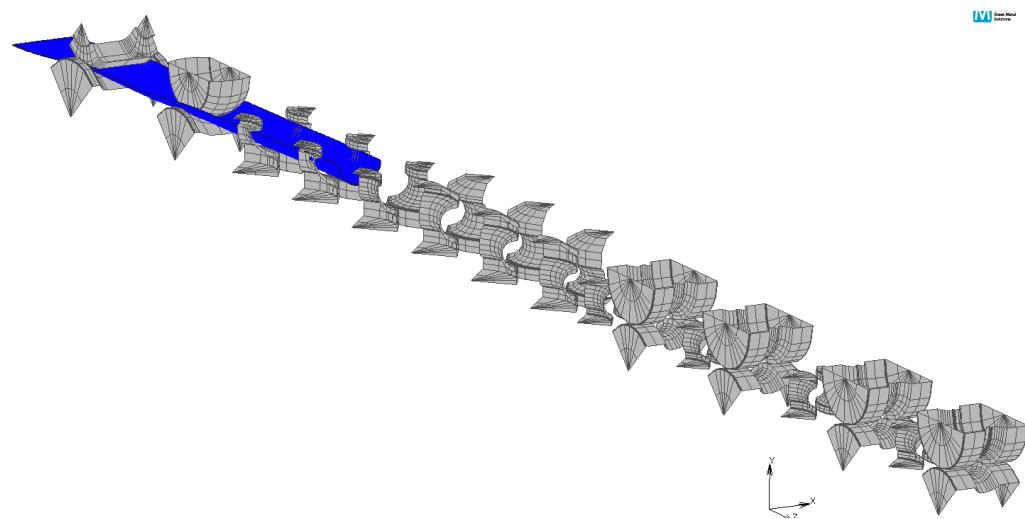


Figura 25- Ilustração do modelo utilizado por COPRA FEA (Linha TIG 3).

Dado que a chapa desliza livremente por entre os rolos laminadores por causa do coeficiente de atrito nulo, os rolos são fixos a fim de diminuir o tempo de cálculo da simulação. Simulações internas na ArcelorMittal em Montataire foram realizadas a fim de comparar os resultados entre as simulações com os rolos laminadores girando e fixos. Os resultados obtidos foram muito semelhantes e, portanto, podem ser considerados como equivalentes em uma primeira abordagem.

Outra medida tomada a fim de diminuir o tempo de cálculo envolve o comprimento da chapa metálica utilizado em simulação. Esse parâmetro foi definido no modelo como sendo 3,3 vezes a distância máxima entre cada etapa de conformação. Essa dimensão é suficientemente grande para permitir uma análise confiável: a chapa metálica sempre estará em contato com pelo menos três pares de rolos laminadores. Mesmo assim, todas as análises se concentraram no meio da chapa para evitar efeitos de bordas.

3.2.1. Os dados de entrada da simulação

Nessa primeira etapa, as simulações foram realizadas utilizando exatamente os parâmetros dimensionais das regulagens da linha TIG 3 descritos nos desenhos técnicos a fim de fazer uma correlação com os resultados obtidos na etapa de análise da chapa metálica real.

Os principais dados de entrada estão relacionados abaixo:

- Largura e espessura da chapa metálica;
- Forma geométrica do ferramental e suas regulagens: antes de começar a simulação no COPRA FEA, foi necessário criar um projeto no COPRA RF levando em conta todas as informações geométricas dos rolos laminadores assim como suas disposições na laminadora de tubos. Dessa forma, os desenhos técnicos contendo as informações geométricas e espaciais dos rolos (dentre elas, a distância entre cada etapa de conformação, a distância entre eixos dos rolos e a altura dos rolos em relação a chapa) foram importados no projeto;
- Curva Tensão vs Deformação do aço inoxidável AISI 304L definida anteriormente na Secção 1-2.2;
- Condições limites (CL): para ser o mais próximo possível da realidade, as CL utilizadas foram definidas de forma a reproduzir o desbobinamento da linha de laminação de tubos impondo a mesma velocidade de deslocamento nas extremidades posterior e anterior da chapa.

3.2.2. Análise da flor de formação

A figura 26 permite observar uma vista explodida da flor de formação obtida na simulação utilizando as regulagens previstas nos desenhos técnicos fornecidos pela fábrica.

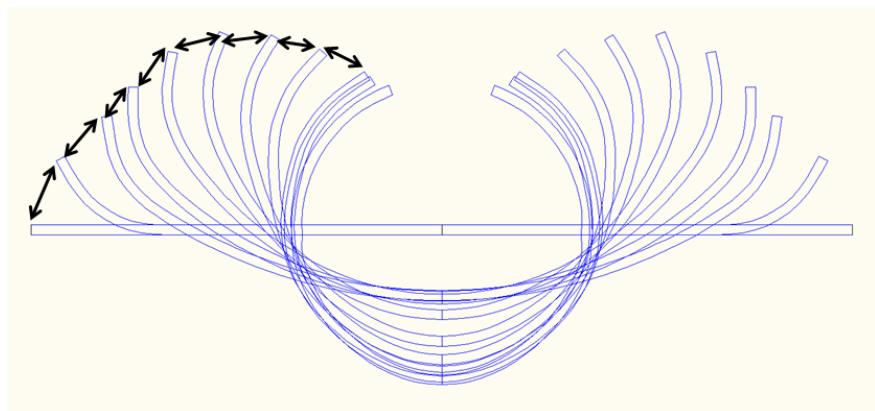


Figura 26- Flor de formação da linha TIG 3 em simulação conforme regulagem da fábrica.

Ao analisar as distâncias das extremidades da chapa entre cada perfil, é interessante notar que cada etapa induz um grau de deformação semelhante. Isso quer dizer que a linha TIG 3 com essas regulagens possui uma boa cronologia de conformação. Isso diminui os riscos de deformação das extremidade no sentido longitudinal, evitando, assim, o surgimento de ondulações que podem afetar prejudicialmente o processo de soldagem do tubo. Além disso, com a simulação é possível confirmar a tendência que a chapa metálica tem em tomar a forma de “V”.

3.2.3. Análise do nível de tensão e deformação do perfil do tubo

Além da análise geométrica da chapa metálica, o pós-tratamento utilizado no software COPRA FEA permite analisar vários outros parâmetros, como por exemplo, os campos de deformação e das tensões induzidas, a pressão de contato, etc.

Sabendo disso, uma secção do tubo na saída da 9^a etapa de conformação (antes de entrar nas etapas com lâmina de pressão) foi tomada para estudo. O objetivo foi de analisar o campo de deformação plástica equivalente e de colocar em evidência a diferença do nível de deformação plástica ao longo do perfil do tubo após as etapas laminadores e guias. Para isso, o estado de deformação foi analisado em três pontos diferentes. Em seguida, os valores da tensão verdadeira nos pontos foram estimados através da curva Tensão vs Deformação do aço AISI 304L. Como é mostrado na figura 27, é possível encontrar valores de tensão verdadeira variando de aproximadamente 490 Mpa até 663 Mpa, o que comprova a heterogeneidade das propriedades mecânicas ao longo do perfil.

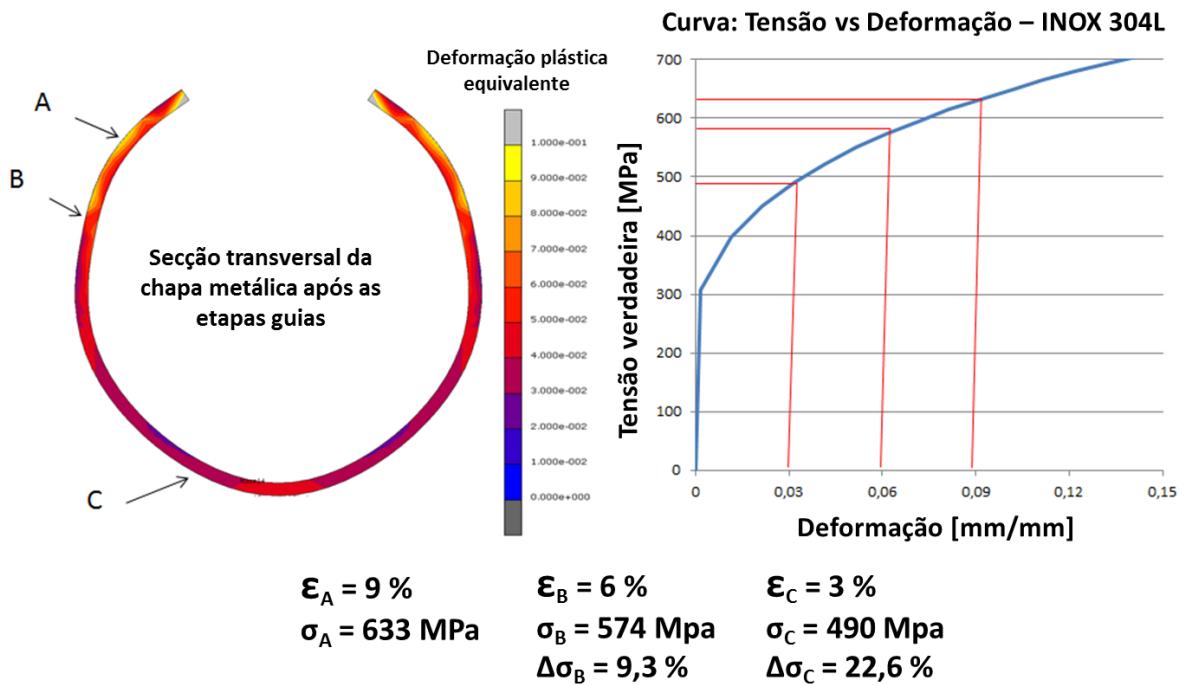


Figura 27- Heterogeneidade das propriedades mecânicas antes de entrar nas etapas com lâmina de pressão.

3.2.4. Correlação: Simulação vs Defeitos

Nessa etapa, as conclusões obtidas através da análise da chapa metálica real serão confrontadas com os resultados obtidos na simulação numérica.

Inicialmente, foi feita uma correlação entre as zonas de contato observadas na simulação com as zonas marcadas sobre a superfície da chapa metálica real, (figura 28).

Para que a análise seja feita da forma mais clara possível, foram analisadas as secções transversais do conjunto dos rolos laminadores junto a chapa metálica durante o processo.

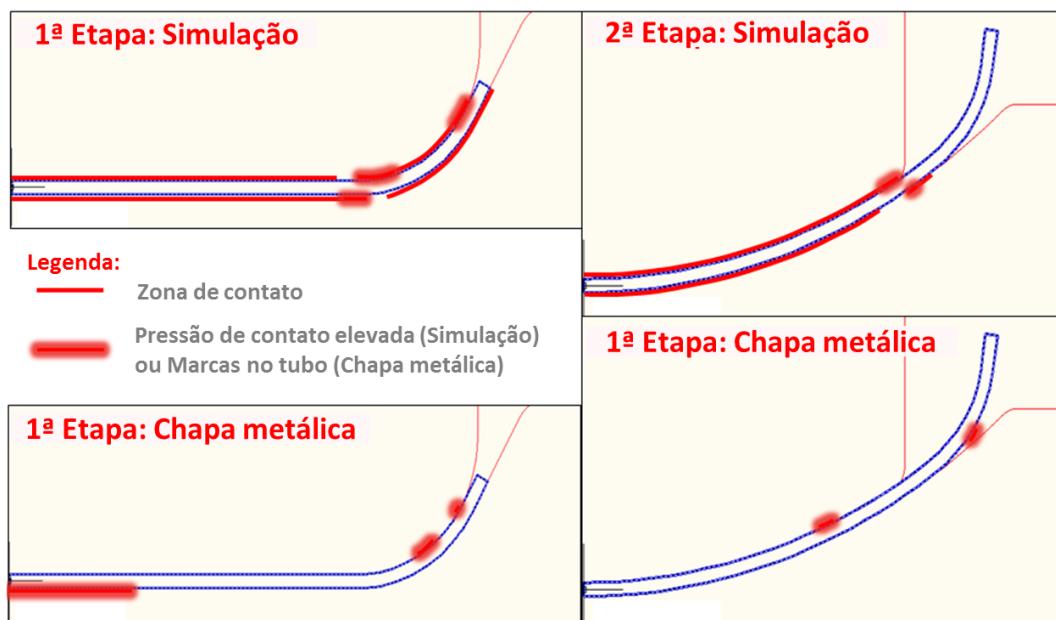


Figura 28- Correlação entre os defeitos visto na chapa metálica e as zonas de contato vistas na simulação (1^a e 2^a etapas).

Conforme é mostrado abaixo, as posições das zonas de forte pressão vistas na simulação não correspondem à posição das marcas encontradas na chapa metálica. Nesse contexto, uma das hipóteses formulada foi de que a linha TIG 3 apresentava regulagens diferentes daquelas utilizadas no modelo numérico. Pensando nisso, a simulação foi refeita variando a distância entre os eixos dos rolos laminadores das etapas de laminação, aqui chamado de PM (figura 29).

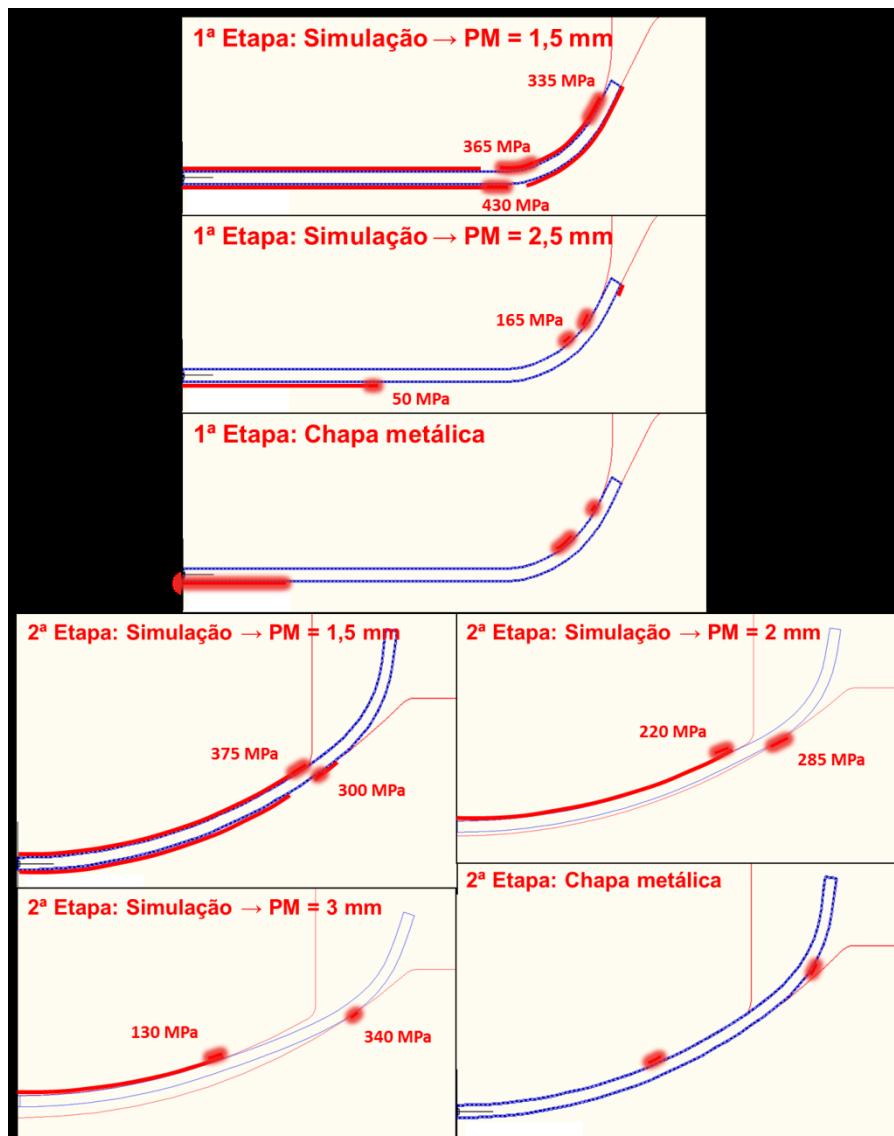


Figura 29- Análise comparativa ao variar a distância entre os eixos dos rolos (1^a e 2^a etapas).

Fazendo uma análise comparativa entre os resultados da figura acima, é possível observar que aumentando a distância entre eixos, as zonas de alta pressão de contato têm uma tendência de se aproximarem das posições onde foram vistas as marcas na chapa metálica. O que pode confirmar a hipótese feita anteriormente. Outro detalhe observado corresponde à diminuição dos valores de pressão de contato ao se aumentar a distância entre eixos, o que deve explicar mudança na regulagem da máquina. Pois ao verificar que os tubos saiam com várias marcas ao fim da produção utilizando a regulagem nominal, os operadores alteravam a

distância entre eixos das etapas laminadoras na tentativa de diminuir a quantidade de marcas na superfície dos tubos.

Conforme foi constatado na Secção 3.1.2, as marcas vistas no interior do tubo originadas nas etapas laminadoras, aparecem nas zonas onde a chapa perde contato com os rolos laminadores superiores. Nesse contexto e analisando a figura 30, é possível confirmar a hipótese que diz que a linha TIG 3 apresenta, na 2^a etapa de conformação, uma distância entre eixos superior àquela descrita nos desenhos técnicos da laminadora.

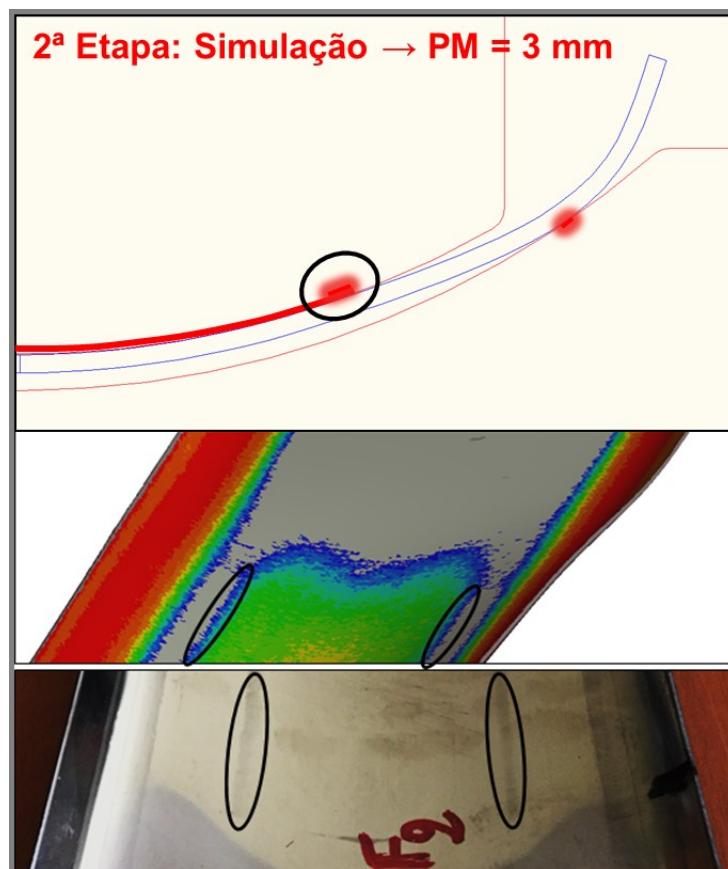


Figura 30- Defeito de conformação incompleta (2^a etapa).

Ao confrontar a posição das zonas de alta pressão de contato vistas na simulação (figura 31) com as marcas vistas na chapa metálica originadas ao longo das etapas guias, observou-se que há certa disparidade. Porém, foi possível explicar o surgimento das marcas na superfície da chapa. Essas marcas se devem ao contato pontual entre os rolos laminadores guias e a chapa metálica devido a

incompatibilidade geométrica entre o formato da chapa metálica e a geometria dos rolos laminadores guias.

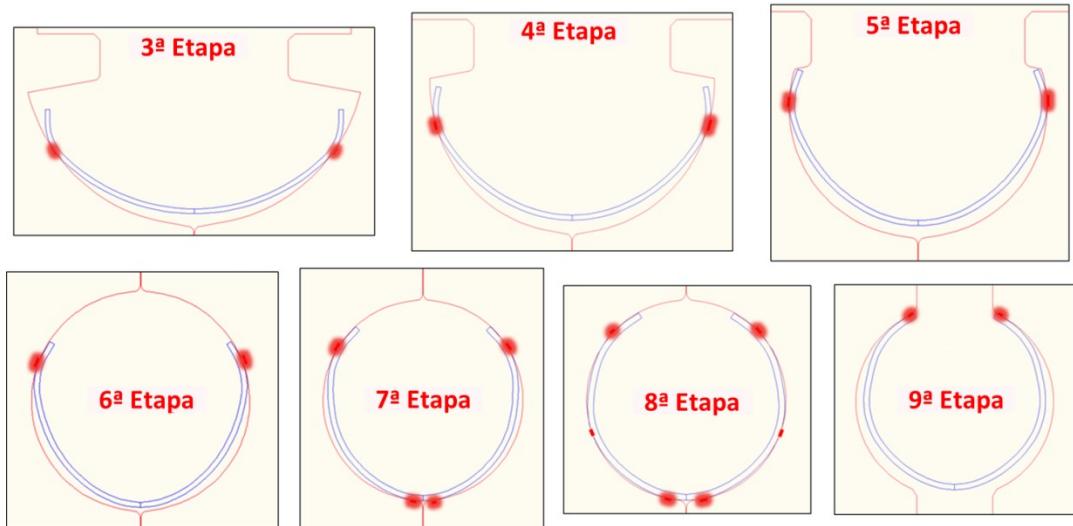


Figura 31- Zonas de contato vistas em simulação (Etapas guias).

Outro detalhe observado na simulação e na digitalização, corresponde à uma parcela de material excedente nas extremidades da chapa metálica na primeira etapa de conformação. Nesse caso, as arestas não são conformadas em sua totalidade, o que pode gerar problemas sérios durante o processo de soldagem do tubo, figura 32.

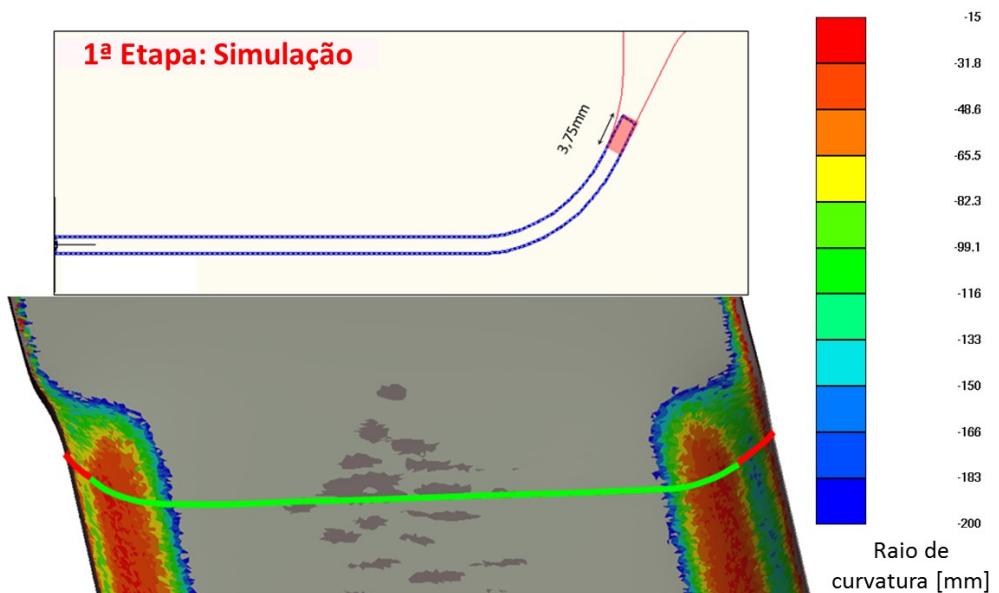


Figura 32- Defeitos de conformação incompleta das extremidades da chapa metálica (1ª etapa).

3.2.5. Resumo conclusivo pós-análises e Plano de Ação

A partir dos resultados obtidos através das análises e levando em conta o investimento destinado ao projeto, foi decidido otimizar apenas as duas primeiras etapas de conformação da linha TIG 3. Essa decisão foi tomada levando em conta a quantidade de defeitos encontrados nas duas primeiras além da forte influência exercidas por elas no processo como um todo.

Essa etapa visará corrigir os defeitos encontrados a nível de conformação mecânica dos dois primeiros pares de rolos laminadores assim como garantir uma formato mais compatível a fim de diminuir o ocorrência de contato pontual nas etapas guias seguintes.

Para otimizar o processo de conformação das duas primeiras etapas, foi proposto o seguinte plano de ação:

- Redefinição da geometria dos rolos das duas primeiras etapas tornando as transições plano-curva mais suaves o que implicaria em uma conformação mecânica menos abrupta e mais progressiva;
- Garantir com que a 2^a etapa de conformação conforme completamente a fundo do tubo a fim de evitar o surgimento de zonas planas;
- Aumentar o comprimento dos rolos laminadores da primeira etapa a fim de que as arestas da chapa sejam conformadas por inteiro, evitando assim o excedente de material nas extremidades da chapa. Desse modo, se diminuirá os riscos das arestas saírem planas o que prejudicaria o processo de soldagem das mesmas;
- Diminuir o raio de curvatura dos rolos laminadores da 2^a etapa de conformação de modo que a chapa metálica tome um formato mais compatível com a geometria dos rolos guias seguintes. Isso representa uma forma de diminuir a pressão de contato nessas etapas subsequentes.

Dessa forma, será possível diminuir os riscos de surgimento de tensões concentradas no fundo do tubo e de problemas envolvendo o processo de soldagem.

3.3. Redefinição da geometria dos rolos laminadores (1^a e 2^a etapas)

Nesta etapa do trabalho serão propostas novas concepções geométricas para as duas primeiras etapas de conformação seguindo o plano de ação descrito anteriormente.

3.3.1. Transições plano-curva suaves

Conforme visto na figura 23, os defeitos superficiais tendem a surgir nas regiões de transição plano-curva e se intensificam conforme a severidade dessa transição. Pensando nisso, decidiu-se suavizar as transições plano-curva na 1^a etapa de conformação, veja a figura 33.

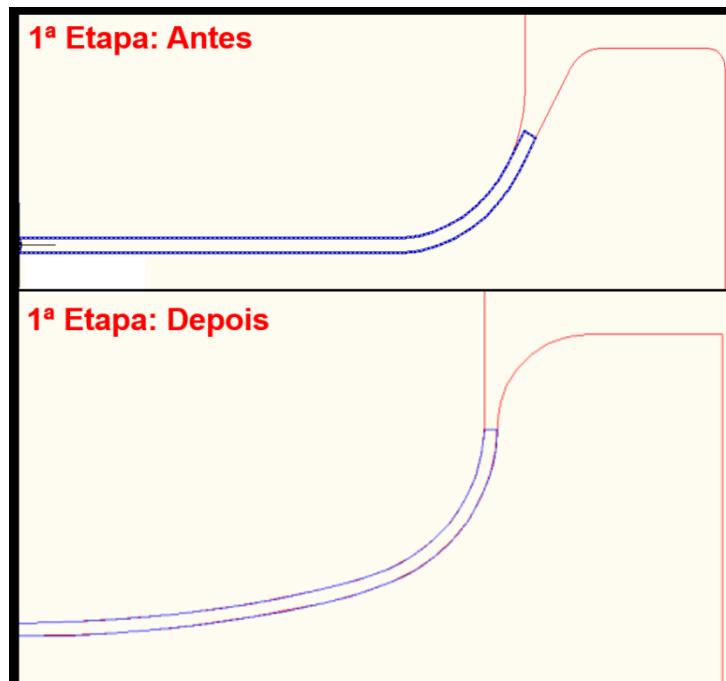


Figura 33- Comparação entre as concepções antigas e novas da 1^a etapa de conformação após suavizar a transição plano-curva.

3.3.2. Conformação completa do fundo do tubo

A fim de evitar o surgimento do fenômeno de esmagamento horizontal do perfil do tubo (figura 18) e a o aparecimento de zonas planas (figura 17), a 2^a etapa de conformação foi modificada alterando basicamente a largura o raio de curvatura dos rolos laminadores, veja a figura 34.

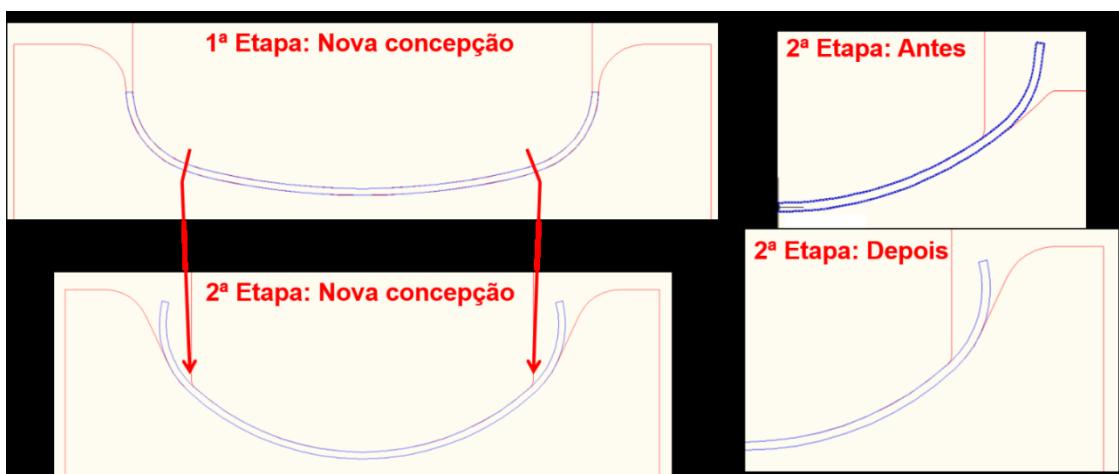


Figura 34- Nova concepção da 2^a etapa de conformação conformando o fundo do tubo por inteiro; Comparação entre as concepções antigas e novas da 2^a etapa de conformação.

3.3.3. Extremidades/arestas da chapa metálica

A fim de evitar problemas relacionados ao processo de soldagem das extremidades da chapa, os rolos laminadores da 1^a etapa foram modificados para que houvesse a conformação completa das extremidades da chapa. Como se pode observar através da figura 35, a nova concepção da geométrica dos rolos laminadores faz com que as extremidades da chapa metálica fiquem dentro da zona de conformação dos rolos garantindo, dessa forma, a conformação completa das extremidades.

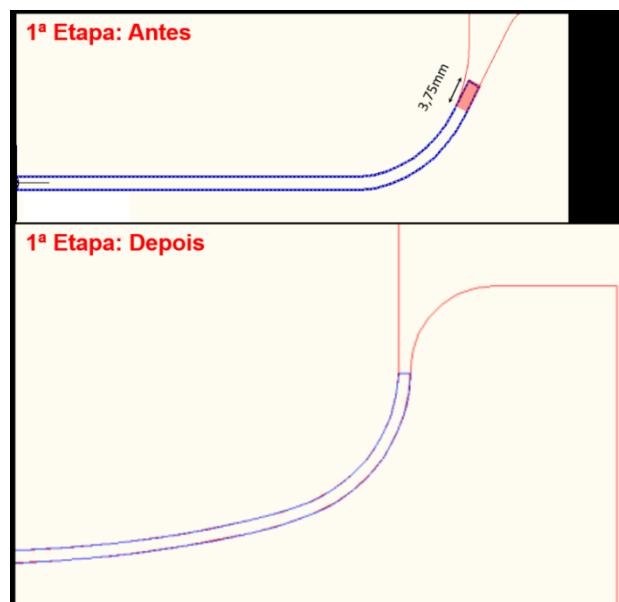


Figura 35- Comparação entre as concepções antigas e novas da 1^a etapa de conformação após suavizar a transição plano-curva.

3.3.4. Formato de chapa metálica compatível com a geometria dos rolos guias

Como dito anteriormente, um das causas do surgimento de marcações no tubo durante as etapas guias é a incompatibilidade geométrica entre o formato da chapa metálica e a geometria dos rolos guias. Como forma de amenizar esse problema, decidiu-se diminuir o raio de curvatura dos rolos laminadores da 2^a etapa de conformação a fim de que a chapa metálica tomasse um formato mais fechado que fosse mais compatível com a geometria dos rolos guias posteriores.

Ao comparar a concepção antiga com a nova quanto ao perfil da chapa pós 2^a etapa de conformação, é possível observar que o esforço de conformação na etapa seguinte será menor na nova concepção do que na concepção antiga visto que o perfil da chapa é mais fechado na nova concepção, veja a figura 36.

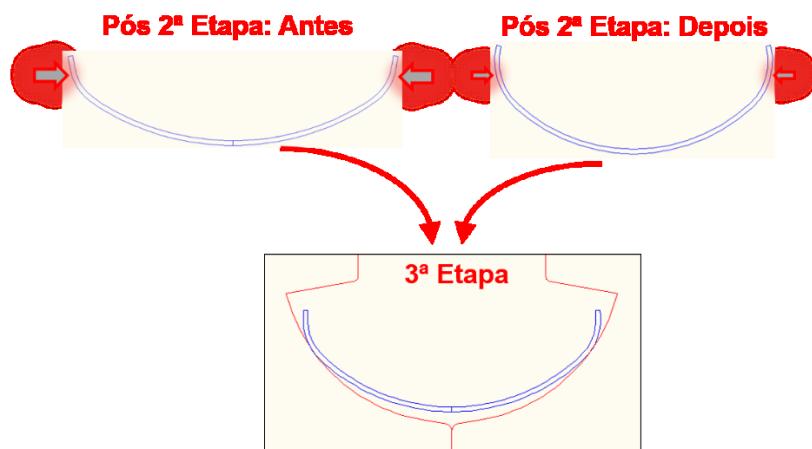


Figura 36- Comparação do perfil da chapa metálica pós 2^a etapa de conformação. (As setas representam os esforços de conformação realizados pelos rolos da 3^a etapa).

Ainda na figura 36 é possível observar que o contato entre a chapa metálica e os rolos guias da 3^a etapa continuará pontual, porém, devido à diminuição da pressão de contato, as marcas serão atenuadas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar todas as modificações nas duas primeiras etapas de conformação seguinte o plano de ação descrito anteriormente, fez-se uma nova simulação a fim de verificar se os aspectos levantados impactaram beneficamente no processo de laminação de tubos da linha TIG 3.

4.1. Análise da flor de formação

Analizando a flor de formação na figura 37, é possível notar que o fenômeno de esmagamento horizontal não impactou fortemente na nova concepção, visto que a chapa metálica é conformada de forma progressiva. Dessa forma, a chapa metálica não apresenta um formato de “V” ao contrário da concepção antiga.

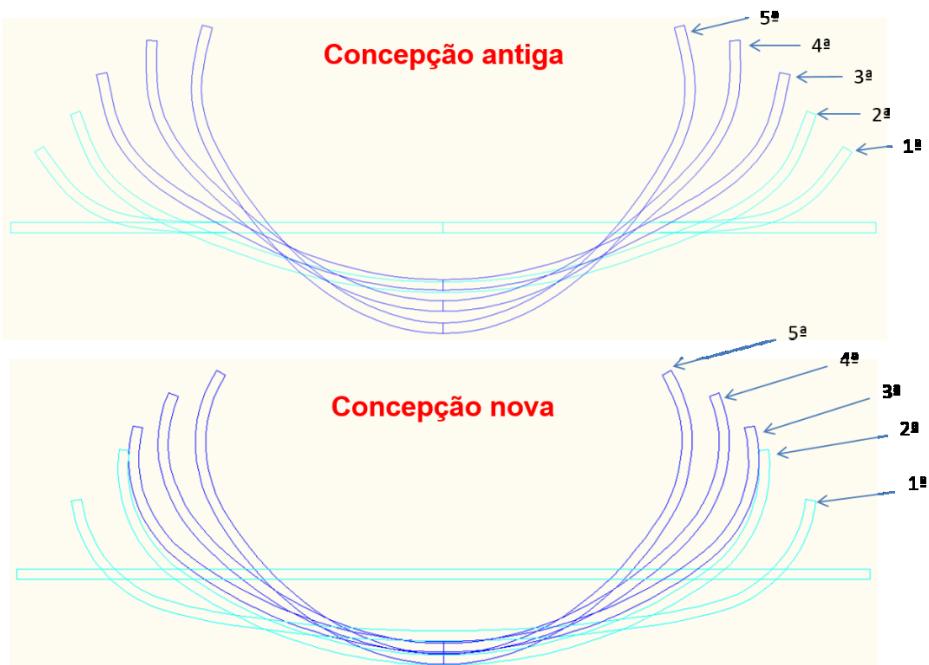


Figura 37- Comparação entre as flores de formação nova e antiga.

4.2. Análise do formato perfil da chapa metálica após 2^a etapa

Ao analisar o formato do perfil da chapa metálica após a 2^a etapa de conformação, pode observar que a nova concepção possui uma geometria muito mais adequada do que o mesmo perfil da concepção antiga. Pode-se observar as seguintes melhorias com relação à concepção antiga:

- Conformação completa das extremidades da chapa metálica;
- Fundo do tubo foi pré-conformado por inteiro ao contrário da concepção antiga a qual houve o surgimento de zonas planas dando início ao fenômeno de esmagamento horizontal;
- Analisando a distribuição da deformação plástica transversal no perfil da chapa metálica (figura 38), pode-se observar uma melhora significativa na homogeneidade da deformação ao longo do perfil. Além da análise visual, pode-se observar essa homogeneidade através da escala das barras de cores. Na concepção antiga, a escala vai de ϵ tração = 0,06 para ϵ compres = -0,035 ($\Delta\epsilon$ = 0,095), enquanto que na concepção nova a escala vai de ϵ tração = 0,049 para ϵ compres = -0,0395 ($\Delta\epsilon$ = 0,0885).

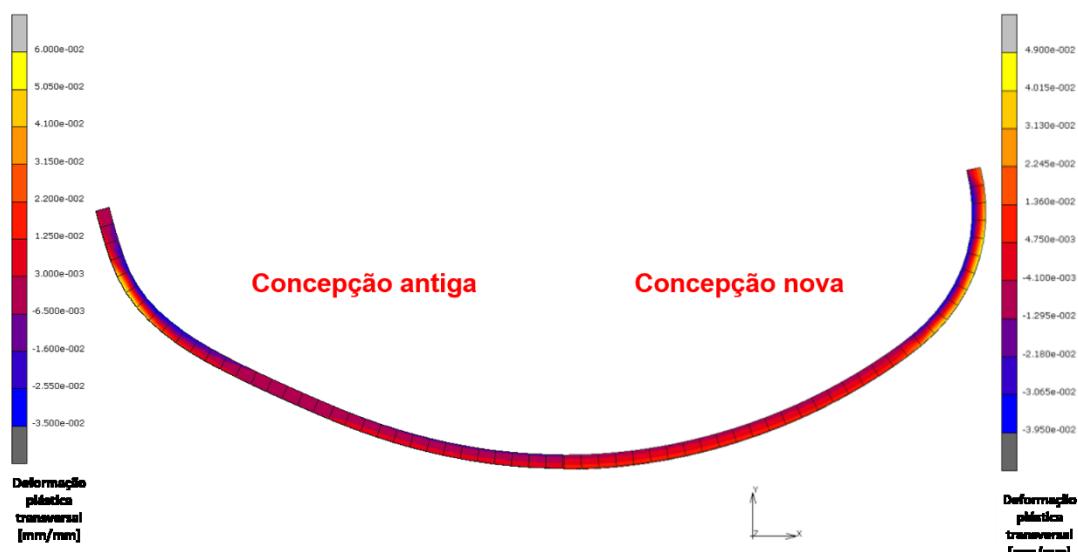


Figura 38- Comparação entre o formato do perfil da chapa metálica após 2^a etapa de conformação, incluindo uma análise da distribuição da deformação plástica transversal no perfil.

4.3. Pontos de atenção sobre a nova concepção da linha TIG 3

Apesar de todas as melhorias alcançadas até então, a nova concepção da linha TIG 3 ainda possui os seguintes pontos de atenção que são objeto de estudo para trabalhos futuros:

- Considerada deformação longitudinal na entrada da chapa metálica para a 1^a etapa de conformação: como discutido na seção 2-3, esse tipo de deformação de concentração pode causar problemas como a ondulação das extremidades da chapa. Porém, como pode-se observar através da figura 39, não houve o surgimento de ondulações nas extremidades após a 1^a etapa de conformação. Mas esse aspecto levantado não deixa de ser um ponto de melhoria para futuros estudos;

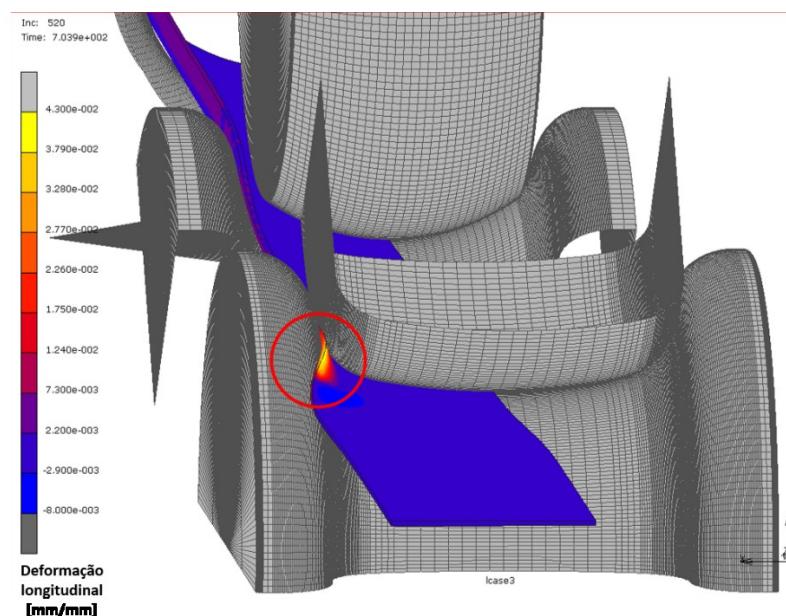


Figura 39- Concentração de deformação longitudinal nas extremidades da chapa metálica.

- Contatos pontuais entre a chapa metálica e os rolos guias: como a Aperam decidiu por otimizar apenas as duas primeiras etapas por questões do financiamento do projeto, um estudo futuro das outras etapas posteriores deve ser considerado visando diminuir as a pressão de contato da chapa com os rolos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Ao finalizar este desse trabalho pôde-se notar que os principais aspectos que impactavam na qualidade dos tubos e, consequentemente, na sua aceitação no mercado europeu, eram relacionados a qualidade superficial e as propriedades mecânica do tubo ao final do processo de laminação.

Após várias análises levando em consideração o estado da máquina de laminação atual e por meio de simulações numéricas, foi possível determinar a causa e a origem de vários fatores que impactava negativamente na qualidade final dos tubos. Munido dessas informações, criou-se um plano de ação com a finalidade de corrigir e até mesmo eliminar certos defeitos presentes nas tubulações. Após a implementação desse plano de ação, uma nova rodada de simulações foi realizada onde foram obtidos os seguintes resultados:

- Após passar pelas etapas de conformação que utilizam rolos laminadores, a chapa metálica não deve apresentar regiões planas. Ou seja, a chapa metálica deve ser, ao menos, pré-conformada mecanicamente antes de passar pela sequência de rolos guias. Isso se deve pelo fato de que os rolos guias impõem a sua forma apenas pelo lado externo da chapa;
- Durante as primeiras etapas de laminação, deve-se garantir a conformação mecânica completa das extremidades da chapa metálica, pois é sempre importante garantir que as mesmas estejam alinhadas em um mesmo plano antes de iniciar a etapa de soldagem. Caso contrário, o processo de soldagem será gravemente impactado;
- Deve-se evitar transições plano-curvas abruptas/severas, pois os resultados obtidos revelam que nessas regiões ocorre o surgimento de marcas sobre a superfície do tubo;

- Deve-se evitar zonas de alta concentração de tensão a fim de garantir a homogeneidade das propriedades mecânicas do tubo ao final do processo;

A nova concepção gerada por meio das simulações numéricas correspondeu positivamente às expectativas iniciais do trabalho: reduzir a pressão de contato a fim de reduzir as marcas sobre a superfície dos tubos, além de garantir uma melhor homogeneidade das propriedades mecânicas dos tubos ao final do processo de laminação.

5.1. Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros a serem realizados após o presente trabalho estão são:

- Usinagem dos rolos laminadores seguindo a geometria obtida por meios dos estudos e simulações numéricas realizadas neste trabalho;
- Montagem desses novos rolos na laminadora da linha TIG 3 realizando todas as modificações necessárias;
- Análise empírica do processo de laminação com os novos rolos laminadores a fim de verificar a existência de defeitos superficiais, além de analisar a homogeneidade das propriedades mecânicas do tubo no final do processo de laminação.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HALMOS, G. T. **Roll Forming HSLA Steels** - *International Conference on Technology and Applications of High Strength Low Alloy (HSLA) Steels*. Philadelphia, Pennsylvania, 1983

BERTRANDIE, J. **Profilage – Journal : Techniques de l'ingénieur Mise en forme des métaux en feuilles**, 1998

APERAM **História da Empresa** Disponível em: <<http://www.aperam.com>>. Acesso em: 29/07/2016.

THE FABRICATOR. **Tube Pipe Production.** Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/tubepipeproduction/the-process-of-contoured-tubing-manufacturing>>. Acesso em: 03/06/2016.

PROFILAGE.NET. Disponível em: <<http://www.profilage.net/profilage.html>>. Acesso em: 05/06/2016.

WIKIPÉDIA. **Scanner Tridimensionnel.** Disponível em: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_tridimensionnel>. Acesso em: 06/06/2016.

HELMAN, H.; Cetlin, P. R **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.** Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983, 170 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Volume I.** McGraw-Hill, 2^a ed., 1986, 315 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Volume II.** McGraw-Hill, 2^a ed., 1986, 315 p.

Data M: Sheet Metal Solutions. **COPRA FEA RF: User Manual.** Am Marschallfeld 17, 2015

KIUCHI, M. **Roll Forming Handbook.** Edited by George T. Halmos, Taylor & Francis Group CRC, 2006

MASAMURA, K., NAGAHAMA, Y. **Manufacturing Processes and Products of Steel Pipes and Tubes in JFE Steel.** JDE Technical Report Nº 7, 2006

FUN-KUO, C., JHENG-KAI, C. H. **Characterization of the Mechanical Proprieties Between Tube and Sheet Metal.** Numicheet 2008, Interlaken, Switzerland, 2008

SEDLMAIER, A. **Predicting The Properties of Welded Roll Formed Tubes for Subsequent Processes Using the Finite Element Method.** International Tube Association Conference (ITA), Czech Republic, 2005

Data M: Sheet Metal Solutions. **COPRA FEA RF: Conception de Galets pour Machine à Tubes.** Am Marschallfeld 17, 2015

MICHAEL, L. **COPRA FEA RF: Conception de Galets pour Machine à Tubes.** Data M: Sheet Metal Solutions, Am Marschallfeld 17, 2015

CAMPOS FILHO, M.P., DAVIES, G.J. **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas.** LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 1978

Welding Handbook Committee – **Weld Handbook Vol I: Welding Science and Technology.** American Welding Society, Miami, FL, 9^a Edition

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, 2012