

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA  
POLITÉCNICA

11/12/02  
90 (M/le)

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE  
COMPONENTES METRO-FERROVIÁRIOS EM AÇO  
INOXIDÁVEL**

/

Márcio Norio Kobayashi

Trabalho de Graduação apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Engenheiro Mecânico

São Paulo  
2002

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA  
POLITÉCNICA

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE  
COMPONENTES METRO-FERROVIÁRIOS EM AÇO  
INOXIDÁVEL**

Márcio Norio Kobayashi

Trabalho de Graduação apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Engenheiro Mecânico

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho

São Paulo  
2002

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Kobayashi, Márcio Norio**

**Otimização de processos de fabricação de componentes metro-ferroviários em aço inoxidável / Márcio Norio Kobayashi. -**  
**- São Paulo, 2002.**

**49 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Aço inoxidável 2.Processos de fabricação 3.Corte a frio**  
**I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho pelo suporte técnico e direcionamento deste trabalho.

Ao Departamento de Industrialização da Alstom Transporte e pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste projeto.

## **RESUMO**

**KOBAYASHI, M.N. Otimização de Processos de Fabricação de componentes metro-ferroviários em aço inox.** 2002. 49 p. Trabalho de Formatura. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Estudo realizado na empresa Alstom do Brasil Ltda, a fim de otimizar o processo de fabricação dos componentes de seus vagões de metrô ou trem. Foi realizada uma análise completa de um destes componentes, o quadro de porta, cujos dados foram analisados e hipóteses de melhoria de processo foram levantadas. As hipóteses foram comparadas entre segundo critérios técnicos e econômicos. Foi feito um estudo mais aprofundado do processo de corte a frio e dimensionada a ferramenta apropriada para esta aplicação. Este projeto foi concluído e a ferramenta foi fabricada, bem como todos os dispositivos necessários para seu perfeito funcionamento. A partir da instalação da ferramenta, pôde-se realizar testes e homologar o novo processo.

## SUMÁRIO

### RESUMO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	3
3. SITUAÇÃO INICIAL .....	4
Descrição .....	4
Fabricação .....	6
Layout do SEAC .....	8
Tempo de Produção .....	9
Qualidade .....	11
4. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ENCONTRADOS <sup>[3]</sup> .....	12
5. ANÁLISE DE SOLUÇÕES .....	14
Processos Alternativos de Corte .....	14
Corte Laser <sup>[4]</sup> .....	14
Corte com Jato d'Água <sup>[4]</sup> .....	16
Corte a Frio <sup>[2][4][6]</sup> .....	17
Corte Plasma <sup>[6]</sup> .....	19
Estudo de Viabilidade <sup>[7]</sup> .....	19
Critérios de Escolha .....	20
Matriz de Decisão .....	20
6. DESCRIÇÃO DO NOVO PROCESSO .....	22
Teoria da Resistência ao Corte <sup>[8]</sup> .....	22
Facas paralelas .....	25
Facas inclinadas .....	27
Parâmetros de projeto .....	31
Material da Peça .....	31
Geometria da Seção de Corte .....	31
Dados da Máquina .....	32
Projeto da Ferramenta .....	32
Força de Corte .....	32
Folga entre Matriz e Punção .....	35
Detalhes de Projeto da Ferramenta .....	35
Desenhos .....	37
Seleção de Materiais para a Ferramenta <sup>[5]</sup> .....	40
Tratamento Térmico <sup>[5]</sup> .....	41

Execução da Ferramenta .....	42
<i>Dispositivo para fixação .....</i>	43
7. ENSAIOS E HOMOLOGAÇÃO .....	44
<i>Tomada de tempos após a implantação do novo sistema .....</i>	44
<i>Operação de corte da perna do quadro de porta.....</i>	45
<i>Tempo Total de fabricação.....</i>	46
8. CONCLUSÃO .....	47
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	48
10. BIBLIOGRAFIA .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vagão cabine modelo New Jersey .....	1
Figura 2 – Perna esquerda de quadro de porta, modelo NEW JERSEY.....	4
Figura 3 – Quadro de porta fechado.....	5
Figura 4 – Desenho de fabricação da perna do quadro de porta aberto .....	6
Figura 5 – Layout simplificado do setor de montagem de quadros de porta, no SEAC. .....	8
Figura 6 – Processo de lixamento interno (acabamento) .....	9
Figura 7 – Extremidade após corte com plasma e lixamento .....	11
Figura 8 – Gráfico dos Tempos de Produção .....	12
Figura 9 - Corte Laser robotizado.....	14
Figura 10 - Corte com Jato d'Água e abrasivos.....	16
Figura 11 - Recorte com um punção reto (esquerda) e com um punção angular (direita) .....	18
Figura 12 - Corte plasma em chapa de aço .....	19
Figura 13 - Forças atuantes no material durante o corte.....	23
Figura 14 - Variação da tensão de corte ao variar a profundidade relativa de corte .....	24
Figura 15 - Curvas de resistência específica de corte a frio.....	25
Figura 16 - Corte de chapa por facas inclinadas .....	27
Figura 17 - Curva de pressão do metal sobre a faca.....	28
Figura 18 - Dispositivo de fixação e jogo lateral entre as facas.....	29
Figura 19 - Seção transversal de corte (dimensões em milímetros).....	31
Figura 20 - Ferramenta para corte completo da seção transversal .....	33
Figura 21 - Ferramenta para corte gradativo da seção transversal.....	33

Figura 22 - Máxima seção de corte com corte gradativo.....	34
Figura 23 - Raio do Punção e raio da Matriz .....	36
Figura 24 - Perspectiva isométrica da ferramenta .....	37
Figura 25 - Perna do Quadro de porta posicionada na Ferramenta .....	37
Figura 26 - Legenda do Desenho da Ferramenta .....	38
Figura 27 - Desenho de Montagem da Ferramenta de Corte.....	38
Figura 28 - Punção e Matrizes.....	39
Figura 29 - Guias do Punção.....	39
Figura 30 - Ferramenta de Corte instalada na Prensa .....	42
Figura 31 - Ferramenta de Corte instalada na Prensa .....	42
Figura 32 - Ferramenta de Corte e Dispositivos de Fixação .....	43
Figura 33 – Gráfico de tempos de Operação (nov/02) .....	45

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tempo de produção do quadro de porta .....	10
Tabela 2 – Matriz de definição do processo de corte .....	20
Tabela 3 – Cálculo da força lateral T .....	26
Tabela 4 - Tempo de operação após implantação do sistema de corte a frio .....	44
Tabela 5 – Comparação entre os tempos totais de fabricação .....	46

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho de formatura foi realizado paralelamente a estágio supervisionado no Setor de Industrialização da Alstom Brasil Ltda (divisão Transporte). Esta empresa fabrica diversos modelos de vagões de trens e metrôs. A montagem completa de alguns tipos de vagões é realizada na Alstom, no entanto, apenas a parte estrutural e os acessórios são produzidos nesta unidade. O projeto é realizado na própria empresa, pelo seu departamento de Engenharia, que o cria a partir de especificações técnicas definidos pelo cliente.



**Figura 1 – Vagão cabine modelo New Jersey**

Cada um desses vagões possui milhares de componentes<sup>1</sup> que compõem sub-montagens que serão finalmente unidas numa montagem final. A grande maioria dos componentes é produzida a partir de chapas ou tubos de aço inoxidável de diversas dimensões, tipos de tratamento térmico e de acabamento superficial.

---

<sup>1</sup> Cerca de 3500 para um vagão modelo New Jersey (apenas parte estrutural) produzido pela ALSTOM Brasil Ltda.

A fabricação destes componentes é realizada através da combinação dos diversos processos existentes de corte, dobra, estampagem, repuxo, calandragem, solda, lixamento, entre outros. Entretanto, esta combinação não deve levar em conta aspectos técnicos apenas, mas também aspectos econômicos, como disponibilidade de máquinas e de funcionários, limitações de tempo e de espaço.

É necessário que seja definida a combinação otimizada desses processos para cada um dos componentes, combinação esta que pode ser aperfeiçoada no decorrer da produção. Isto ocorre devido ao aperfeiçoamento de materiais (tanto matéria-prima quanto ferramentas), bem como com a implantação de novas tecnologias (como robôs para soldar).

## 2. OBJETIVO

No contexto apresentado anteriormente, o objetivo deste trabalho é otimizar o processo de fabricação destes componentes. Como seria inviável para esse trabalho de graduação analisar todos os componentes produzidos, tomou-se o caso de uma peça em particular. Trata-se de uma sub-montagem denominada quadro de porta, que será mais bem descrita a seguir.

O procedimento utilizado para esta peça poderá ser aplicado a outros componentes uma vez que será feita uma análise completa, ou seja, esta análise levará em conta todos os aspectos julgados relevantes para um componente fabricado através dos mesmos processos e matéria-prima. Além disso, o desenvolvimento de projetos deste tipo é um processo de melhoria contínua, que não pode se acomodar.

### 3. SITUAÇÃO INICIAL

#### Descrição

A peça analisada é a perna do quadro de porta do vagão modelo NEW JERSEY. O quadro de porta se trata de uma sub-montagem que vai na parte externa do vagão, no vão da porta. O quadro de porta é composto de duas pernas, no entanto, elas não são iguais. Uma delas é oposta da outra (como numa porta normal).



**Figura 2 – Perna esquerda de quadro de porta, modelo NEW JERSEY**

Existem quadros de porta abertos (para as portas menores) e fechados (para as maiores). As quantidades necessárias de quadros de porta, por vagão, são: 4 para vagão cabine (2 abertas e 2 fechadas) e 6 para o vagão trailer (4 abertas e 2 fechadas). Desta forma, são necessárias 8 e 12 pernas de quadro de porta para vagões cabine e trailer, respectivamente.



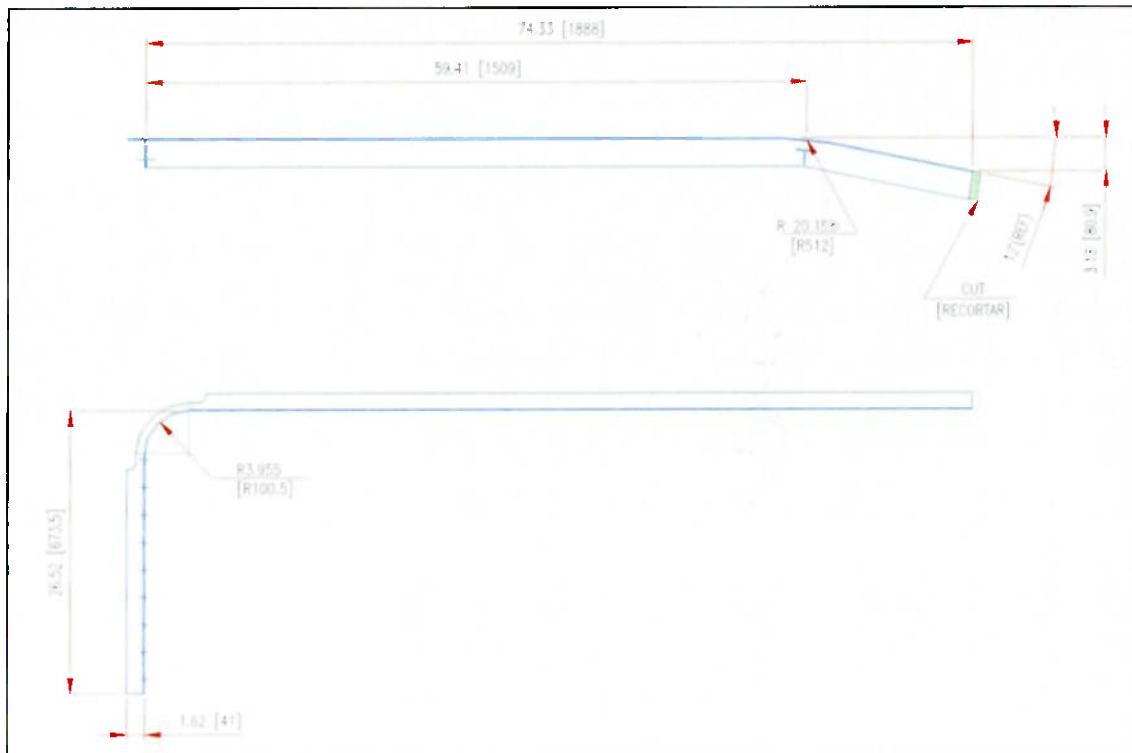
**Figura 3 – Quadro de porta fechado**

A produção de vagões deste tipo na Alstom é, em média, de 24 unidades por mês<sup>2</sup>, o que nos dá uma produção mensal de 240 pernas de quadro de porta.

---

<sup>2</sup> Apenas a parte estrutural, denominada “caixa”.

## Fabricação



**Figura 4 – Desenho de fabricação da perna do quadro de porta aberto**

O processo de fabricação para cada perna de quadro de porta utilizado atualmente, seja do quadro de porta aberto ou do fechado<sup>3</sup>, é o seguinte:

- Inicialmente é feito um blank na máquina de corte laser, de acordo com as especificações da engenharia. Esta operação é terceirizada.
- Este blank é levado à dobradeira, onde é feito o seu perfil de 90°, de largura  $\frac{3}{4}$  e raio 1/8.
- Em outra dobradeira, utilizando uma ferramenta apropriada, é feito o maior raio, de 512 mm.

<sup>3</sup> Os dois processos se diferenciam apenas por algumas dimensões e na montagem final, sendo suas pernas submetidas aos mesmos processos de fabricação.

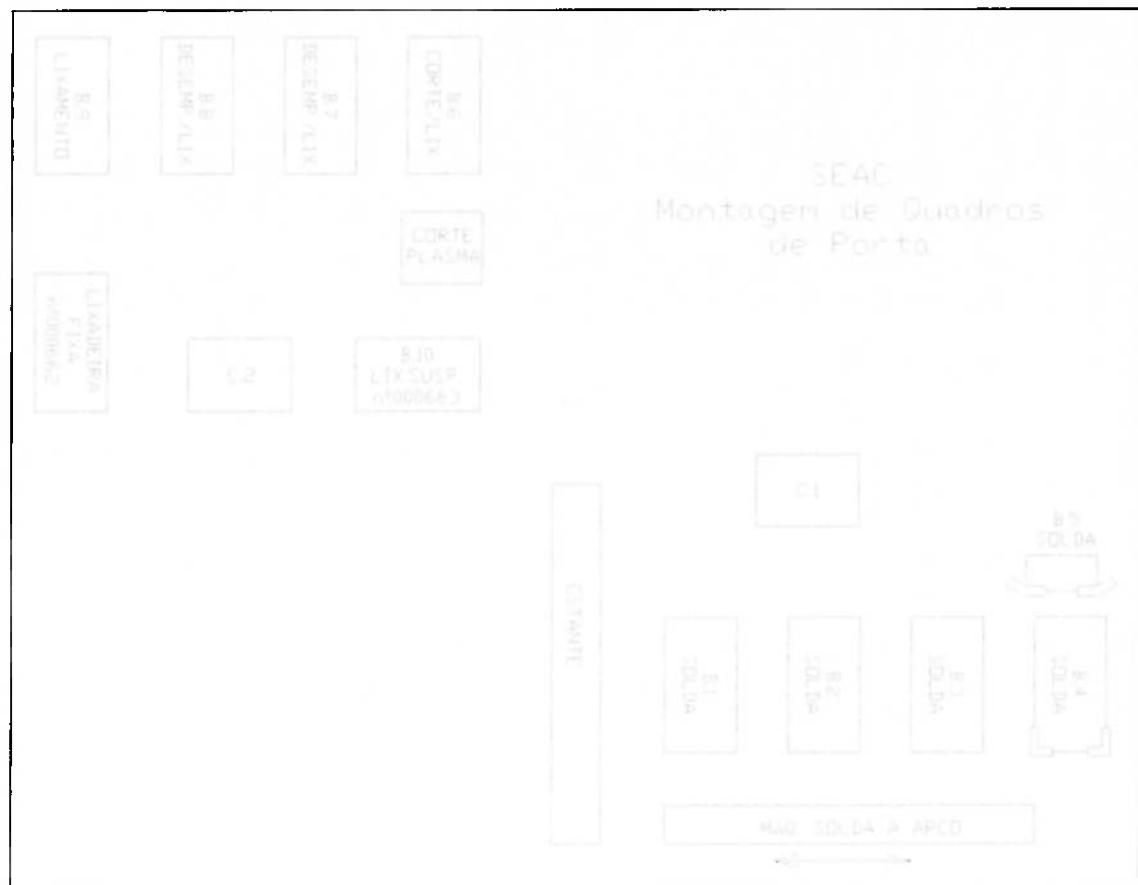
- (d) Executa-se o raio de 100,5 mm na máquina de curvar perfis. Em seguida, as peças são enviadas ao setor de acessórios (SEAC).
- (e) No SEAC, a peça sofre os ajustes finais, como soldagem de outros elementos, acabamento e finalmente o processo de montagem final do quadro de porta.

O processo que será analisado neste trabalho é o que ocorre no SEAC, uma vez que os processos utilizados na parte de preparação (corte, dobra), já estão bastante desenvolvidos, utilizando processos relativamente novos e eficientes. O tempo gasto na preparação é cerca de apenas 1/5 do tempo gasto no SEAC.

No SEAC, são realizadas as operações de ajuste, como refilamento, solda de outros componentes, lixamento, desempeno, montagem final e acabamento.

## Layout do SEAC

No SEAC, a disposição das máquinas e equipamentos é a seguinte:



**Figura 5** – Layout simplificado do setor de montagem de quadros de porta, no SEAC.

## Tempo de Produção

A seguir serão expostos os tempos de produção no SEAC. Foi realizada uma análise bastante detalhada para que possam ser localizados, num ponto mais avançado do projeto, os pontos mais críticos neste ciclo produtivo.



**Figura 6 – Processo de lixamento interno (acabamento)**

Os códigos 20082.42.072/073 são referentes às pernas dos quadros de porta. Os outros códigos são referentes a outros componentes que são agregados a estes para a montagem final. A coluna “Local” da tabela a seguir indica a posição na qual é realizada a operação e deve ser vista no *layout* apresentado anteriormente.

**Tabela 1 – Tempo de produção do quadro de porta**

	<i>Operação</i>	<i>Local</i>	<i>Tempo (min)</i>
<b>1</b>	Transporte, da estante para a bancada B.4, de pernas e peças para soldar.		1,0
<b>2</b>	Soldar a peça 20082.42.031 (ângulo reto) na perna (20082.42.072/073), com a máquina de solda a arco.	B.4	11,0
<b>3</b>	Transportar a perna para a bancada B.5		1,0
<b>4</b>	Soldar as peças 20082.42.029 (ângulo obliqua), utilizando a máquina de solda a arco. Procedimento para duas pernas.	B.5	8,0
<b>5</b>	Transportar as pernas para o cavalete C.2		1,0
<b>6</b>	Transportar do cavalete C.2 para a bancada B.7 ou B.8		1,5
<b>7</b>	Desempenar. Duas pernas	B.7 ou B.8	12,0
<b>8</b>	Transportar da bancada B.8 para a bancada B.10		0,5
<b>9</b>	Lixar, com a lixadeira suspensa, os excessos de solda.	B.10	28,0
<b>10</b>	Cortar a perna (comprimento), com auxílio de gabarito.	B.10	8,0
<b>11</b>	Transportar da bancada B.10 para a bancada B.7 ou B.8		1,0
<b>12</b>	Lixar o excesso de solda que ainda resta, com lixadeira manual.	B.7 ou B.8	4,0
<b>13</b>	Transportar da bancada B.7 ou B.8 para o cavalete C.1		1,5
<b>14</b>	Transportar do cavalete C.1 para B.1, B.2 ou B.3, dependendo do modelo.		1,0
<b>15</b>	Soldar as pernas direita e esquerda (e outras peças, dependendo do modelo) para fechamento.	B.1, B.2 ou B.3	47,0 fechada 29,0 aberta
<b>16</b>	Transportar de B.1, B.2 ou B.3 para B.6		1,0
<b>17</b>	Cortar o sobremetal dos quadros de porta com a máquina de corte plasma e lixar, com a lixadeira manual, até dar o formato final da peça.	B.6	210,0 fechada 140,0 aberta
<b>18</b>	Desempenar	B.6	10
<b>19</b>	Transportar de B.6 para a Lixadeira de fita fixa.		2,0
<b>20</b>	Primeira etapa do acabamento interno.	Lixadeira de Fita	31,0
<b>21</b>	Transportar da Lixadeira de Fita fixa para a bancada B.9.		0,5
<b>22</b>	Segunda etapa do acabamento, com uma lixadeira manual.		48,0
<b>23</b>	Transportar para lixadeira de fita de mesa.		4,0
<b>24</b>	Acabamento externo.	Lixadeira de bancada	15,0
<b>Tempo total</b>			448 fechada 360 aberta

## Qualidade

O controle de qualidade é realizado pelo próprio operador, que dispõe de gabaritos para conferir facilmente as dimensões da peça. Fazendo uma análise quanto à qualidade das peças acabadas, pode-se apurar que a incidência de perda de material ou a necessidade de retrabalhá-la é muito pequena.



**Figura 7 – Extremidade após corte com plasma e lixamento**

As principais não-conformidades encontradas entre estas peças são:

- Empenamento, seja este por problema de transporte, de solda ou de outro processo envolvido.
- Defeitos nas soldas (porosidade, respingos, mordedura, etc.)
- Medidas irregulares por problemas em lixamento

#### 4. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS ENCONTRADOS [3]

Tendo em mãos os dados necessários para uma visão geral do processo de fabricação, será feita uma análise crítica de seus pontos principais para que só então possam ser identificados os pontos de modificação neste processo.

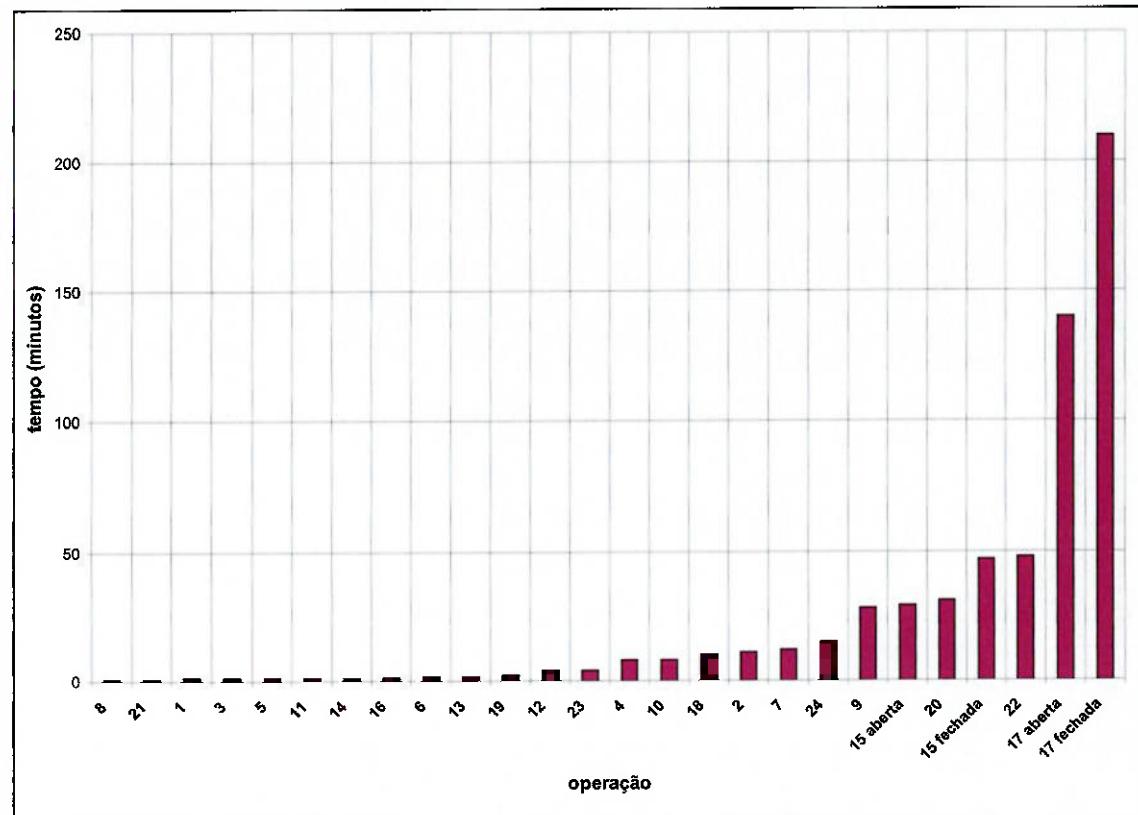


Figura 8 – Gráfico dos Tempos de Produção

Analizando do ponto de vista de tempo de processo, a operação mais morosa ou o “gargalo” da produção, é a de refilamento (operação de número 17) de cada uma das pernas. Esta operação toma de 38,9% a 46,9% do tempo de produção nos quadros de porta fechados e abertos, respectivamente. As operações de solda e acabamento também são demoradas, correspondendo a cerca de 10% do tempo total de produção.

Tendo em mãos esses dados, é razoável definir a operação 17 como a mais crítica para estas peças, uma vez que, a segunda operação mais crítica

(soldagem e seu acabamento) é um processo amplamente conhecido por esta empresa, além de ser uma das únicas alternativas para unir as peças<sup>4</sup>.

Como citado anteriormente, esta operação consiste no recorte de cada uma das pernas do quadro de porta no seu comprimento (refilamento). Atualmente esta operação é realizada com uma máquina de corte plasma, exigindo prévia marcação e acabamento posterior.

A realização de tal recorte pode ser questionada, no entanto ela é necessária devido às imprecisões da máquina de dobrar perfis; ou seja, há necessidade de que esta peça seja maior no comprimento devido ao excesso de material exigido pela máquina de curvar perfis (ângulo de 90º).

---

<sup>4</sup> A realização de uma peça sem soldas é inviabilizada pelas suas dimensões e ausência de máquina apropriada.

## 5. ANÁLISE DE SOLUÇÕES

Tendo em vista que a operação a ser realizada é de recorte da perna do quadro de porta, serão analisados alguns processos de recorte de chapas metálicas existentes. Será feita uma breve apresentação de cada um destes processos, com o intuito de mostrar suas aplicações, vantagens e limitações.

Vale salientar que este trabalho, além de ser um objeto de pesquisa, é feito dentro de uma empresa que tem seus próprios interesses e, além de analisar os fatores técnicos e econômicos do projeto, leva em conta também o tempo de implantação e a necessidade de mão-de-obra. Isto é ainda mais significativo no caso deste tipo, indústria, onde a produção não pode ser caracterizada como uma produção em série, sempre trabalhando com lotes mensais da ordem de centenas de peças<sup>5</sup>.

### Processos Alternativos de Corte

#### Corte Laser<sup>[4]</sup>

O corte laser é capaz de cortar chapas de aço, vaporizar aços duros de reatores e ainda cortar o material mais duro encontrado na natureza: o diamante. O raio laser pode ser utilizado tanto em materiais finos quanto em materiais extremamente espessos.



**Figura 9 - Corte Laser robotizado**

---

<sup>5</sup> Atualmente são produzidos cerca de 20 vagões por mês.

O laser praticamente não tem utilidade por si só. Ele necessita de um guia e deve ser implementado em um sistema ou máquina. Além disso, deve ser direcionado ao ponto onde a energia é necessária.

Durante o corte de chapas e placas com laser, o raio laser focado é a única ferramenta utilizada e é suplementado por um gás de corte. O material é fundido em uma área confinada. Esta se funde ou vaporiza. O gás resultante ou o metal fundido é assoprado usando uma corrente de gás e um vão com a espessura do corte (*kerf*) é produzido.

Este processo de corte possui algumas vantagens com relação a processos alternativos como corte plasma, corte com jato d'água ou corte a frio. Algumas destas vantagens são relacionadas a seguir:

- O corte com raio laser permite que seja feito um corte sem contato físico ou necessidade de força.
- Os mais diversos formatos de peças podem ser cortados, sem haver necessidade de mudança de ferramenta (caso da tesoura).
- Pode cortar os mais diversos formatos de peças e o corte é feito precisamente, com uma pequena largura de corte e alta velocidade.
- A alta velocidade deste processo resulta em uma mínima zona afetada pelo calor. Isto permite que haja pequenas distorções que são supostamente desprezíveis no processamento de chapas metálicas.
- As superfícies cortadas pelo laser têm muito baixa rugosidade. Quanto mais fina a chapa, mais lisa é a borda.

No entanto, a qualidade do corte depende de alguns fatores principais como uma consistente e precisamente definida potência do laser, excelente qualidade do raio, polarização e pureza do gás utilizado. Estes são os elementos importantes para garantir a repetitividade do processo.

De acordo com os enormes avanços feitos na tecnologia de corte a laser, este vem se tornando a alternativa genuína para outros processos quando fatores econômicos são levados em consideração.

### Corte com Jato d'Água [4]

O corte com jato de água utiliza partículas sólidas abrasivas, normalmente de *garnet* ou *olivina*. A água é submetida a pressões de até 4000 bar e o jato chega a atingir 900 mm/s. Esta técnica de corte apresenta as seguintes vantagens em relação aos outros métodos:

- Pode ser usado em diversos tipos de materiais como metais, rochas, vidro, plásticos, materiais compósitos e sintéticos duros. Além disso, propriedades como condutibilidade elétrica ou térmica e propriedades ópticas (no caso de materiais reflexivos) não influenciam o processo de corte, sendo por isso considerado como um processo suplementar ao corte a laser. É um processo de corte a frio.
- Pode ser usado para o corte de peças espessas, de até 100 mm de espessura. Além disso, não possui restrição quanto ao formato do perfil da peça a ser cortada.

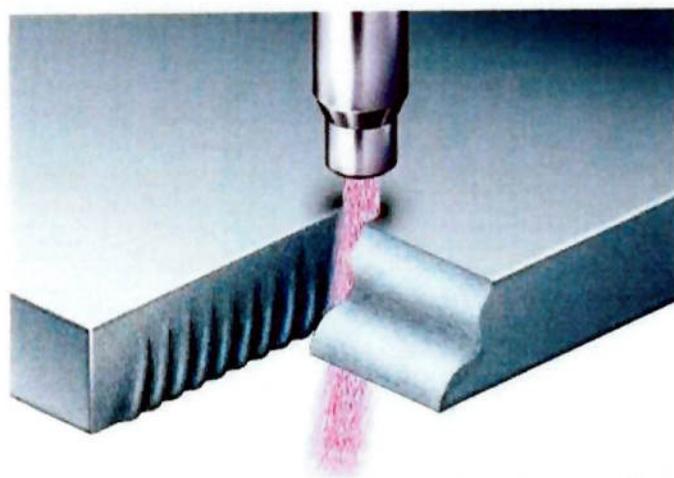


Figura 10 - Corte com Jato d'Água e abrasivos

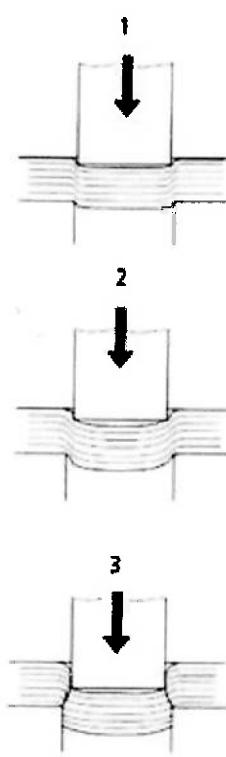
Possui as seguintes restrições:

- Não se pode começar a cortar diretamente no contorno da peça, é preciso que o processo comece em uma região da chapa que não será aproveitada. Só depois que o jato perfurar a chapa, inicia-se o movimento do jato até que este chegue no contorno da peça.
- A velocidade de corte deve ser reduzida antes de chegar a cantos do contorno da peça.

- A espessura de corte tem aproximadamente o valor do diâmetro do bocal por onde sai o jato de corte, o que geralmente vale em torno de 0.8 mm.
- Deve-se evitar começar a utilizar o jato de água com abrasivo a partir de contornos já começados. Caso não seja possível evitar, deve-se começar com uma baixa velocidade do jato e aumentá-la gradativamente.

### Corte a Frio<sup>[2][4][6]</sup>

O corte na tesoura ou na ferramenta de corte resulta do movimento de fechamento de duas arestas afiadas, sobre um material posicionado entre as mesmas. O material é cisalhado até o ponto de fratura, após passar pelas três fases descritas a seguir.



1. Deformação: como as arestas cortantes começam a se fechar sobre o material, ocorre deformação de ambos os lados deste, próximo à aresta cortante.
2. Penetração: As arestas cortantes cortam ou penetram no material, causando o aparecimento de linhas de fratura.
3. Fratura: O ponto no qual linhas de fratura superiores e inferiores se encontram. Neste momento o trabalho está feito, mas no caso de punctionamento, o punção deve continuar para livrar a peça (liberar o furo formado).

No entanto, há diversos fatores que influenciam e limitam a utilização deste processo: espessura do material, tipo e dureza do material, folga entre as

arestas cortantes, condição das arestas cortantes, apoio do material em ambos os lados do corte, relação entre o diâmetro e a espessura da chapa.

A força necessária para cortar o material neste processo, é facilmente calculada através do produto da tensão de cisalhamento do material por seu perímetro de corte e sua espessura.

Uma alternativa bastante comum para reduzir a força de corte é utilizar uma tesoura ou ferramenta de corte progressivo. Note na figura abaixo a diferença entre os dois tipos de punção. Para o punção reto, a força máxima requerida é muito maior que a do punção com ângulo, no entanto, o trabalho total (área abaixo da curva) é o mesmo para cortar uma mesma chapa.

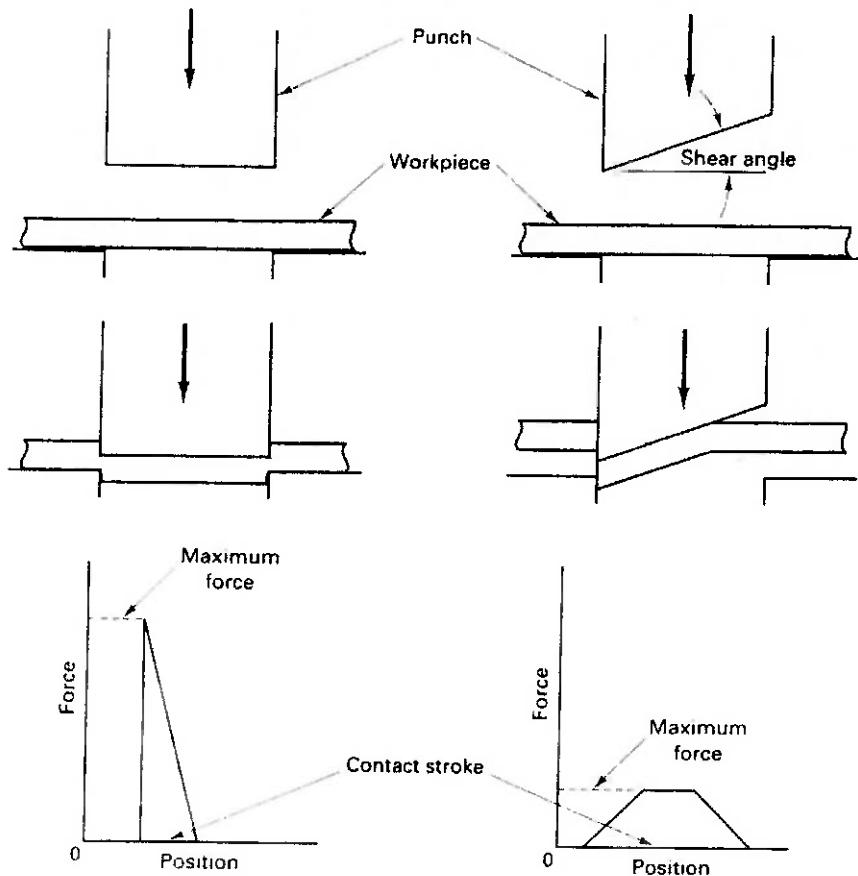


Figura 11 - Recorte com um punção reto (esquerda) e com um punção angular (direita)

### Corte Plasma<sup>[6]</sup>

A tocha usada no corte plasma produz a mais alta temperatura possível de qualquer fonte prática. Suas altas temperaturas (até 33.000 °C) o permitem cortar praticamente qualquer tipo de material, simplesmente fundindo o material e soprando-o do corte.



**Figura 12 - Corte plasma em chapa de aço**

Este tipo de corte é superior aos cortes alimentados por oxigênio. No entanto o corte plasma não consegue um foco muito preciso, logo não consegue atingir níveis de acabamento aceitáveis para manufatura. Por isso, o corte plasma foi limitado aos materiais que não podem ser cortados por processos de corte cujo combustível é o oxigênio.

### **Estudo de Viabilidade<sup>[7]</sup>**

Neste item serão analisados os critérios escolhidos para selecionar a melhor alternativa dentre os processos descritos anteriormente, de acordo com a metodologia da matriz de decisão que será feita posteriormente.

### Critérios de Escolha

- Custo de produção – este critério leva em conta o tempo (de produção e regulagens) e a facilidade de operação.
- Custo de implantação – inclui-se neste item o conjunto dos custos oriundos da implantação deste novo processo, levando em conta equipamentos disponíveis na empresa ou novas aquisições.
- Qualidade – este critério leva em conta a qualidade da peça final, além de sua capacidade de repetir os resultados.
- Segurança – neste critério serão analisados os aspectos de segurança durante sua operação.

### Matriz de Decisão

Desta matriz, sairá a alternativa mais adequada para o novo processo, levando em conta os critérios apresentados no item anterior. Para esta escolha, são definidos pesos de (1 a 5) para cada um dos critérios e notas (de 1 a 10) para avaliá-los. Os maiores pesos são para os mais importantes e as melhores notas são para os mais adequados segundo o critério. A maior nota definirá a melhor alternativa.

**Tabela 2 – Matriz de definição do processo de corte**

Critério	Peso	LASER		JATO D'ÁGUA		A FRIA		PLASMA	
		Nota	N x P	Nota	N x P	Nota	N x P	Nota	N x P
Custo de produção	5	6	30	7	35	10	50	5	25
Custo de implantação	5	3	15	2	10	8	40	6	30
Qualidade	3	9	27	8	24	8	24	3	9
Segurança	2	9	18	9	18	3	6	8	16
<b>Total</b>			<b>90</b>		<b>87</b>		<b>120</b>		<b>80</b>

O processo de corte a frio é o mais adequado segundo os critérios adotados para construir esta matriz de decisão. É importante esclarecer que a empresa não possui máquina de corte com jato d'água e nem corte laser robotizado (a peça a ser cortada é um perfil), além de a máquina de corte plasma ser alugada. Para o processo de corte a frio, há uma prensa que está disponível.

## 6. DESCRIÇÃO DO NOVO PROCESSO

Como definido no item anterior deste trabalho, o processo a ser implementado será o de corte a frio, utilizando maquinário disponível. Como se trata de um perfil, a peça não pode ser recortada na tesoura existente; será necessário o projeto de uma ferramenta especial para esta finalidade.

Antes de analisar este caso em particular, será abordada com maiores detalhes a teoria de resistência corte, utilizada para facas paralelas e inclinadas, bem como para ferramentas de corte a frio em geral.

### Teoria da Resistência ao Corte<sup>[8]</sup>

Em tesouras de facas paralelas o ângulo de corte das lâminas é geralmente de 90°. O processo de corte ocorre em duas fases:

1. No início do corte a lâmina penetra no material – deformação plástica.
2. Quando a faca atinge determinado comprimento o processo de corte propriamente dito se inicia.

Quando as facas penetram no material por ambos os lados da chapa, o momento  $P.a$  é criado, este que tenta girar a peça no sentido horário, como mostrado na figura 12. A rotação da peça será resistida pelas forças horizontais  $T$ , das bordas das lâminas. Se desconsiderarmos o peso da peça e de seus suportes, o ângulo de rotação até que se efetue o corte, é calculado pela equação  $P \cdot a = T \cdot c$ , onde  $c$  é o braço de alavanca da força  $T$ .

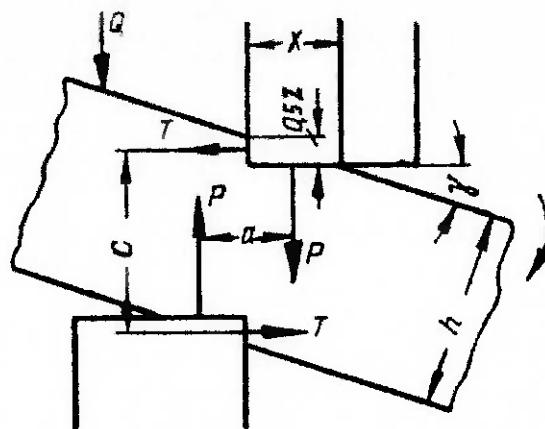


Figura 13 - Forças atuantes no material durante o corte

Se considerarmos iguais as pressões específicas nas áreas  $x$  e  $z$ , ou seja,

supondo verdadeira a expressão  $\frac{P}{x} = \frac{T}{z}$  então a relação entre as forças  $P$  e  $T$

$$\text{será } T = P \cdot \frac{z}{x} = P \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

No entanto, o ângulo de rotação da peça até o instante do cisalhamento,

tomando os valores  $a = x = \frac{z}{\operatorname{tg} \gamma}$  e  $c = \frac{h}{\cos \gamma} - z$ , depende da profundidade de

penetração, portanto teremos:  $\frac{z}{h} = \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{sen} \gamma$

Emprega-se freqüentemente dispositivos de fixação do ângulo  $\gamma$ ; esses dispositivos efetuam uma prensagem da peça com uma força  $Q$  contra a faca inferior. Como consequência, também se reduz a força  $T$ , tendendo a separar as facas. Durante o período de penetração, a força  $P$  será igual a:

$$P = p \cdot b \cdot x = p \cdot b \cdot \frac{z}{\operatorname{tg} \gamma}, \text{ onde } p \text{ é a pressão específica e } b \text{ é a largura do corte.}$$

Substituindo o valor de  $\operatorname{tg} \gamma$ , a força  $P$  fica  $P = p \cdot b \cdot \sqrt{z \cdot h}$

Se considerarmos durante o período de penetração a pressão específica é constante, a força  $P$  aumenta parabolicamente (figura 13), até alcançar um valor determinado para iniciar o corte do metal ao longo de toda a sua seção

transversal, de acordo com a equação  $P = k \cdot b \cdot \left( \frac{h}{\cos \gamma} - 2 \cdot z \right)$ , onde  $k$  é a resistência ao corte de  $1\text{mm}^2$  da seção transversal.

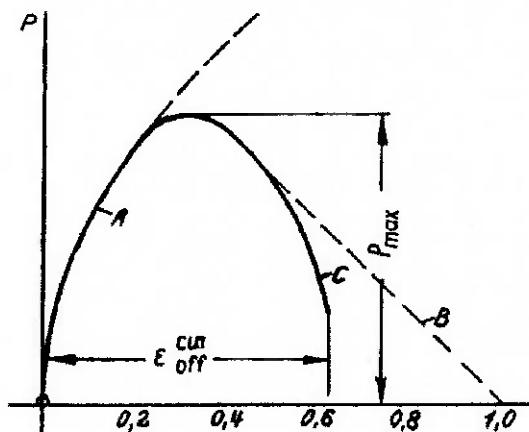


Figura 14 - Variação da tensão de corte ao variar a profundidade relativa de corte

Se  $k$  é constante, a força  $P$ , de acordo com a equação anterior, diminui ao longo da reta tracejada B, mas na realidade, um aumento de  $z$  conduzirá a uma diminuição de  $k$  e, conseqüentemente, a força  $P$  diminui mais rapidamente ao longo da curva C. As curvas de corte mais exatas são determinadas experimentalmente.

Normalmente os dados experimentais são colocados e, forma de curvas de resistência específica de corte  $k = f(\varepsilon)$ , onde  $k$  é a resistência específica de corte, isto é, a tensão nominal ao corte relativa à seção transversal inicial e  $\varepsilon$  é a profundidade relativa de corte,  $\varepsilon = \frac{z}{h}$ . As curvas obtidas experimentalmente aparecem na Figura 15.

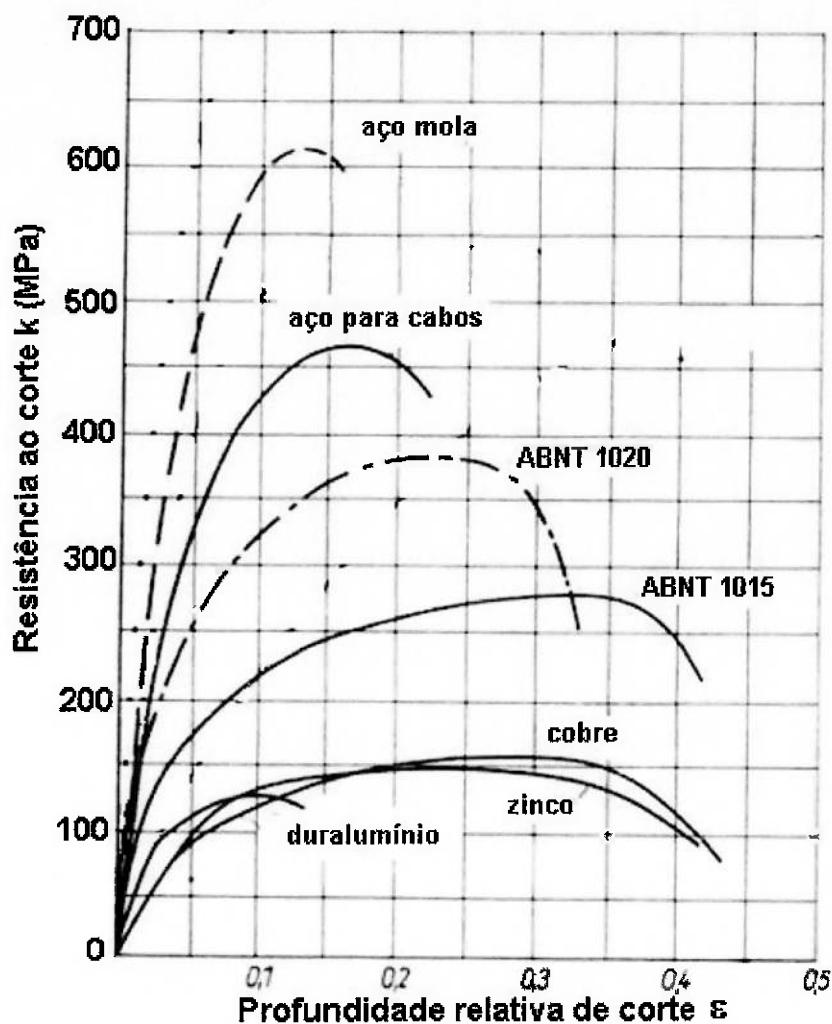


Figura 15 - Curvas de resistência específica de corte a frio

Comparando as curvas de corte a frio, podemos observar que quanto mais duro e frágil o metal, mais rapidamente se alcança a força máxima de corte e mais curta é a duração do mesmo, a qual se pode caracterizar pela profundidade relativa de corte que corresponde à ruptura final.

#### Facas paralelas

O esforço total de corte depende da penetração das lâminas,  $z = h \cdot \varepsilon$ , e é determinado multiplicando-se as ordenadas das curvas de  $k = f(\varepsilon)$  pela área transversal da peça,  $A$ .

$$P = k \cdot A$$

Se, para um material determinado, não se dispõe de curva experimental  $k = f(\varepsilon)$ , a tensão de cisalhamento e a penetração correspondente à faca são determinadas a partir da curva mais próxima às condições de corte em questão com a introdução de correção nas equações seguintes:

$$P \cong k' \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma'_B} \cdot A \quad \text{e} \quad z \cong \varepsilon' \cdot \frac{\delta}{\delta'} \cdot h,$$

onde  $\frac{\sigma_B}{\sigma'_B}$  e  $\frac{\delta}{\delta'}$  são as relações da carga de ruptura e dos alongamentos relativos ao metal cortado e do metal correspondente à curva suposta;  $k'$  e  $\varepsilon'$  são as coordenadas das curvas supostas.

O esforço máximo de corte, para facas paralelas, será dado por:

$$P_{MAX} = Y \cdot \sigma_B \cdot A$$

onde  $Y = \frac{\tau_{MAX}}{\sigma_B}$  é o coeficiente de transição do esforço de tração máxima com corte, dependendo este valor do material cortado e da qualidade das facas (oscila entre 0,7 e 0,8).

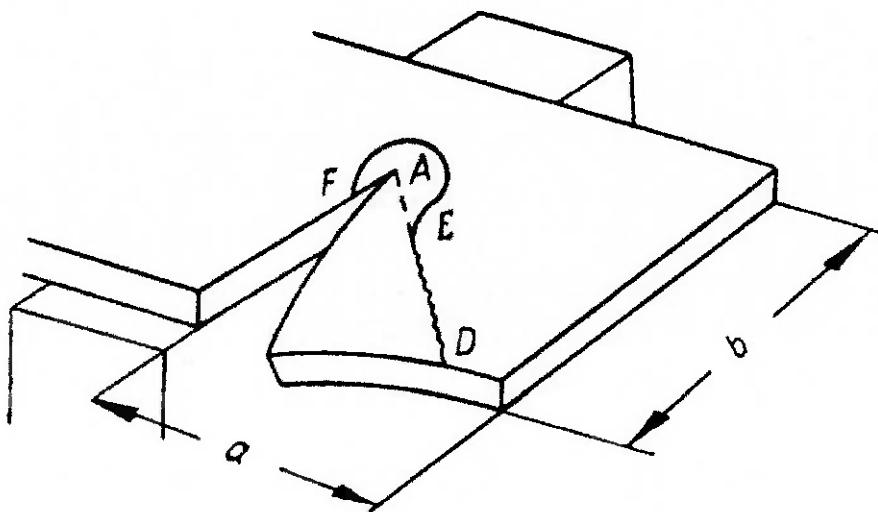
A pressão lateral sobre as facas quase nunca é levada em consideração de acordo com a equação  $T = P \cdot \operatorname{tg} \gamma$ . Como orientação pode-se considerar a Tabela 3:

**Tabela 3 – Cálculo da força lateral T**

	$\gamma$	$T$
sem dispositivo de fixação	10° a 20°	0,18P a 0,35P
com dispositivo de fixação	5° a 10°	0,1P a 0,18P

Este esforço  $T$  é levado em consideração para dimensionamento do suporte da faca e da própria máquina.

Facas inclinadas



**Figura 16** - Corte de chapa por facas inclinadas

Os cortes inclinados em ferramentas de corte a frio são empregados para cortar peças relativamente grossas e largas. Neste caso, a inclinação da faca reduz o esforço de corte devido ao aumento do caminho percorrido pela faca. O esforço de corte completo se representa por três componentes.

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \text{ onde}$$

$P_1$  esforço de corte principal

$P_2$  esforço de dobra da parte cortada da tira que gira para trás ao longo da linha ADE (figura 15) pela faca superior, durante o corte.

$P_3$  esforço de dobra do metal na zona de corte, porque nesta zona, aproximadamente ao longo do perímetro do arco FE, forma-se uma cratera devido à pressão da faca superior, isto é, uma dobra local em forma de copa.

A componente  $P_1$  é determinada através da fórmula de Tselikov<sup>[9]</sup>, baseada no seguinte: na chapa, a zona de corte se limita à parte hachurada do triângulo ABC (figura 16). O valor do esforço de corte, na área de largura  $dx$  será:

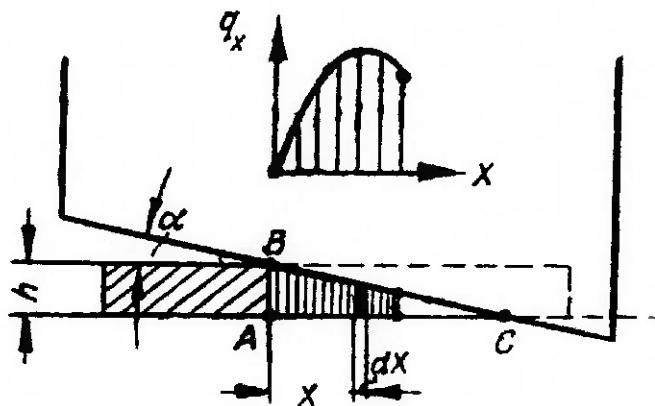


Figura 17 - Curva de pressão do metal sobre a faca

$$dP_x = q_x \cdot dx = K \cdot h \cdot dx, \text{ onde}$$

$q_x$  esforço de corte por unidade de comprimento da faca

$h$  espessura da chapa

Pela expressão de profundidade relativa de corte neste local:

$$\varepsilon = \frac{x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{h}, \quad \text{onde } \alpha \text{ é o ângulo de pressão entre as facas.}$$

$$\text{Vemos que: } dx = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot d\varepsilon$$

Sendo a linear relação entre  $\varepsilon$  e  $x$ , podemos supor que a curva  $q_x = f(x)$  dos esforços de corte ao longo da linha de contato do metal com as facas (fig. 16), seja similar à curva  $K = f(\varepsilon)$ , diferenciando-se unicamente as escalas dos eixos coordenados. Integrando-se a expressão de  $dP_x$  e substituindo-se o valor de  $dx$  teremos o esforço de corte real

$$P_1 = \frac{h^2}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \int K \, d\varepsilon$$

Considerando-se  $\rho = \int K d\varepsilon$ , vem:

$$P_1 = \frac{h^2 \cdot \rho}{t g \alpha}$$

O valor  $\rho = \int K d\varepsilon$  chama-se trabalho específico de corte e é igual à área limitada pela curva  $K = f(\varepsilon)$  ou o trabalho de cortar um corpo de prova de seção transversal 1 mm<sup>2</sup> com altura 1 mm.

No entanto, se para um determinado material não se dispõe do valor experimental de  $\rho$ , pode-se determiná-lo aproximadamente através da expressão:

$$\rho = \tau_{MÉDIO} \cdot \varepsilon_{RUPTURA}, \quad \text{onde:}$$

$\tau_{MÉDIO}$  resistência média ao corte

vale de 0,75  $\tau_{MÁX}$  a 0,85  $\tau_{MÁX}$

$\varepsilon_{RUPTURA}$  profundidade relativa de corte, correspondente à separação final de uma parte do metal da outra

Esses valores são expressos freqüentemente em função da tensão de ruptura  $\sigma_B$  e do alargamento relativo nos ensaios destrutivos à tração  $\delta$ , isto é :

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{MÉDIO} = k_1 \cdot \sigma_B \\ \varepsilon_{RUPTURA} = k_2 \cdot \delta \end{array} \right\} \quad \rho = k_1 \cdot \sigma_B \cdot k_2 \cdot \delta$$

tomando os valores  $k_1 = 0,6$  e  $k_2 = (1,2 \text{ a } 1,6)$ , temos :

$$\rho = (0,72 \text{ a } 0,96) \cdot \sigma_B \cdot \delta$$

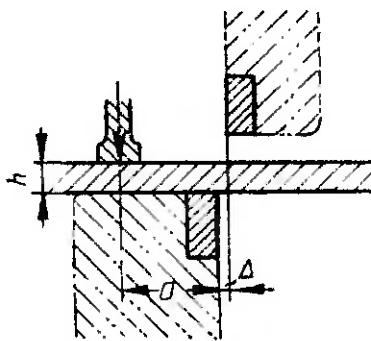


Figura 18 - Dispositivo de fixação e jogo lateral entre as facas

O jogo lateral<sup>6</sup>  $\Delta$  da figura acima deverá ser considerado igual a 0,07h quando  $h \leq 5\text{mm}$  e aproximadamente igual a 0,5mm quando  $10\text{mm} < h < 20\text{mm}$ . Para compensar uma possível quebra de cantos das facas, recomenda-se que a força de corte seja aumentada de 15% a 20%.

O trabalho de corte de uma faca inclinada é igual ao produto da força pelo caminho percorrido pela lâmina. 
$$\tau = P \cdot b \cdot \operatorname{tg}\alpha$$

É importante salientar que as fórmulas expostas de força e trabalho de corte com facas inclinadas se aplicam a um processo de corte normal, quando  $b \cdot \operatorname{tg}\alpha > h$

---

<sup>6</sup> Na ferramenta de corte é equivalente à folga entre a matriz e o punção na posição final de corte.

## Parâmetros de projeto<sup>7</sup>

### Material da Peça

Aço Inoxidável .125" ST 301LN

Tensão de escoamento: 415,5 MPa

Tensão de ruptura: 761,6 MPa

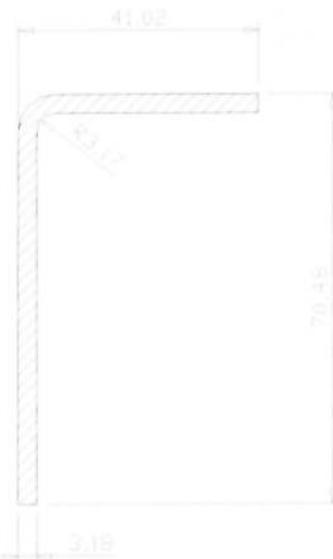
Tensão de cisalhamento: 552,9 MPa

Alongamento: 35%

Composição<sup>8</sup>:

C%	0,026
Si%	0,5
Mn%	1,35
Ni%	6,62
Cr%	17,59
N%	0,123
S%	0,001 (máxima)
P%	0,025 (máxima)

### Geometria da Seção de Corte



**Figura 19** - Seção transversal de corte (dimensões em milímetros)

<sup>7</sup> Fonte: Instruções de Engenharia da Alstom

<sup>8</sup> Fonte: *Bordereau d'expedition. UGINE S.A.*

Área da Seção Transversal de corte:  $A_{SC} = 408,83 \text{ mm}^2$

#### Dados da Máquina

- Prensa Excêntrica n.º: 05-07
- Fabricante: MAHNKE
- Força Máxima: 25 toneladas
- Curso: regulável de 8 a 80 mm
- Distância máxima entre a Sobremesa e o Martelo: 300 mm
- Golpes por Minuto:  $160 \pm 5\%$

#### **Projeto da Ferramenta**

Através de estudo detalhado das necessidades, concluiu-se que o tipo de ferramenta a ser utilizado seria uma ferramenta para recorte com duas faces cortantes, de tal forma que seja possível cortar tanto a peça desenhada quanto a oposta (uma de cada vez). Desta forma evitaria-se a necessidade de troca de ferramenta e também a realização de um segundo conjunto para recorte<sup>9</sup>.

#### Força de Corte

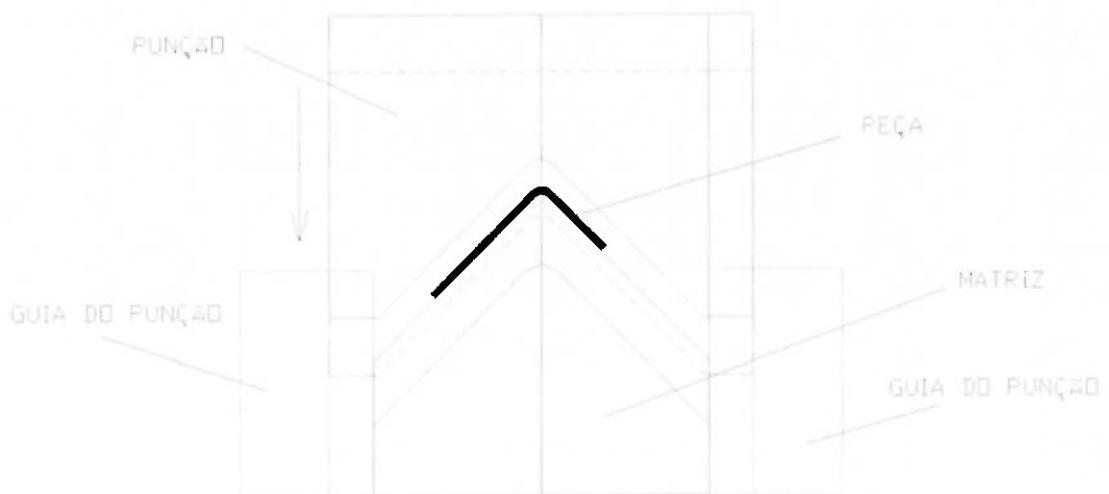
Para realizar um corte completo da seção transversal, a força de corte necessária é calculada a seguir:

$$\begin{aligned}
 P_{MAX} &= Y \cdot \sigma_B \cdot A \\
 P_{MAX} &= \left( \frac{552,9 \text{ N}}{\text{mm}^2} \right) \cdot 761,6 \text{ N/mm}^2 \cdot 408,83 \text{ mm}^2 \\
 P_{MAX} &= 226.042,0 \text{ N}
 \end{aligned}$$

---

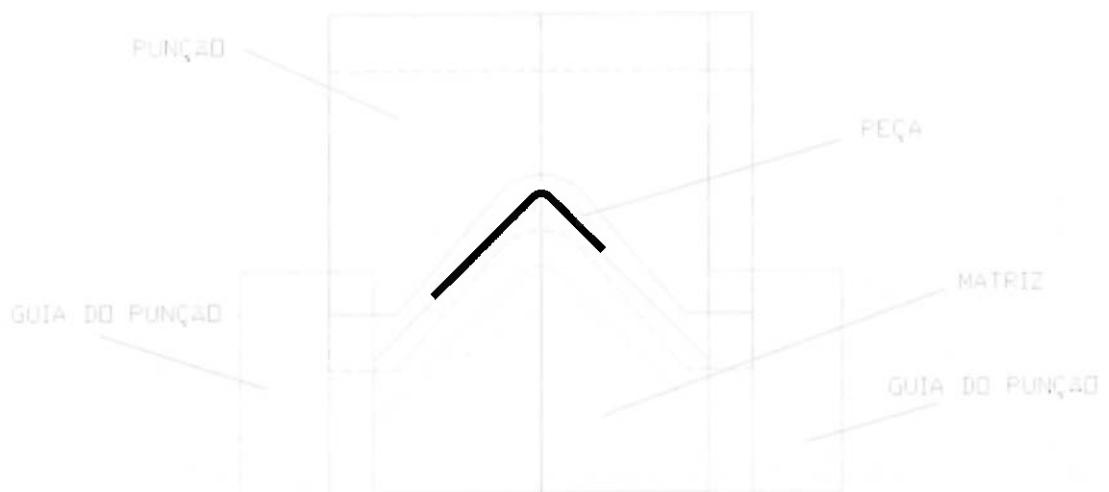
<sup>9</sup> Nesta concepção, a mesma ferramenta serviria para recortar a peça desenhada e a oposta.

Este valor, apesar de ser inferior à capacidade da máquina (25 toneladas  $\approx$  250kN), está muito próximo de seu limite. Esta não é uma boa condição para se trabalhar com uma máquina desse tipo (prensa excêntrica).



**Figura 20** - Ferramenta para corte completo da seção transversal

No entanto, é possível realizar um corte gradativo, através de uma lâmina inclinada, de tal forma que não haja necessidade de todo este esforço para cortar a seção. Com a realização de corte gradativo, a cada momento o punção corta um perímetro menor que o perímetro total de corte (mesma idéia das tesouras inclinadas), exigindo uma força de corte menor. Esta alteração viabilizaria tecnicamente a prensa disponível.



**Figura 21** - Ferramenta para corte gradativo da seção transversal

Para se chegar a um valor menor para o corte da peça, optou-se por diminuir o ângulo de corte do punção, de tal forma que a peça seja cortada das bordas para o centro.

Sendo assim, chegou-se ao valor de  $80^\circ$  para a abertura do punção. Com esta abertura, a “maior” área cortada pelo punção é de  $A_{SC} = 103,84\text{mm}^2$ . Fazendo uma analogia com a teoria das facas inclinadas, tem-se que  $\alpha=5^\circ$ . Pode-se recalcular a força de corte:

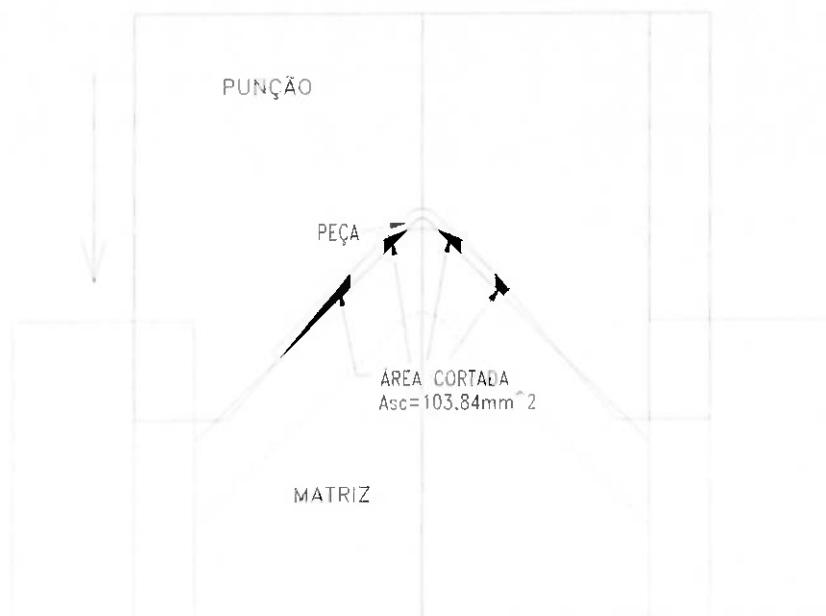


Figura 22 - Máxima seção de corte com corte gradativo

Utilizando os dados disponíveis para este material, é mais conveniente utilizar seguinte fórmula para o cálculo de  $\rho$ :

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \tau_{MÉDIO} \cdot \varepsilon_{RUPTURA} \\ \tau_{MÉDIO} = 0,6 \cdot \sigma_{RUPTURA} \end{array} \right\} \rho = 0,6 \cdot \sigma_{RUPTURA} \cdot \varepsilon_{RUPTURA} = 0,6 \cdot 761,6 \cdot 0,35$$

$$\rho = 159,94 \frac{N \cdot mm}{mm^3}$$

$$P_{MAX} = \frac{h^2 \cdot p}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$P_{MAX} = \frac{(3,175 \cdot \text{mm})^2 \cdot \left( 159,94 \frac{\text{N} \cdot \text{mm}}{\text{mm}^3} \right)}{\operatorname{tg} 5^\circ}$$

$$P_{MAX} = 18.428,6 \text{ N}$$

No entanto, este valor deve ser multiplicado por  $\sqrt{2}$ , pois a ferramenta funciona como duas tesouras inclinadas de  $45^\circ$  (cada uma delas com  $\alpha=5^\circ$ ) atuando ao mesmo tempo. Logo a força de corte fica:

$$P = \sqrt{2} \cdot P_{MAX}$$

$$P = \sqrt{2} \cdot 18.428,6 \text{ N}$$

$$P = 26.062,0 \text{ N}$$

Como a capacidade máxima da prensa é de 25 toneladas (aproximadamente 250kN), este corte pode perfeitamente ser realizado nessa máquina sem que haja necessidade de trabalhar perto de seu limite de carga.

#### Folga entre Matriz e Puncão

A folga entre a matriz e o puncão é determinada a partir da espessura da chapa e do tipo de material a ser cortado. No caso desta ferramenta, que vai cortar um aço do tipo .125"ST (chapa de espessura  $h=3,175\text{mm}$ ). Este cálculo serve para cada face de corte, ou seja, como esta ferramenta tem duas faces opostas cortantes, é necessário que cada um dos lados tenha a mesma folga.

Para este tipo de material, a folga é dada

$$\Delta = 0,07 \cdot h = 0,07 \cdot 3,175$$

$$\Delta = 0,22 \text{ mm}$$

#### Detalhes de Projeto da Ferramenta

Tendo em vista os requisitos para esta ferramenta, chegou-se ao seguinte modelo, adaptado às dimensões da máquina disponível. Para o

desenvolvimento deste modelo final, foram levados em conta diversos aspectos construtivos.

- Todos os itens que são unidos entre si, levam pinos guia, para garantir a precisão da montagem, uma vez que tanto a folga entre punção e matrizes quanto a das guias do punção.
- O raio de abertura do punção é maior que o raio superior da peça para diminuir as concentrações de tensão neste ponto do punção (geometria desfavorável), além de ser mais adequado para o corte gradativo da peça.

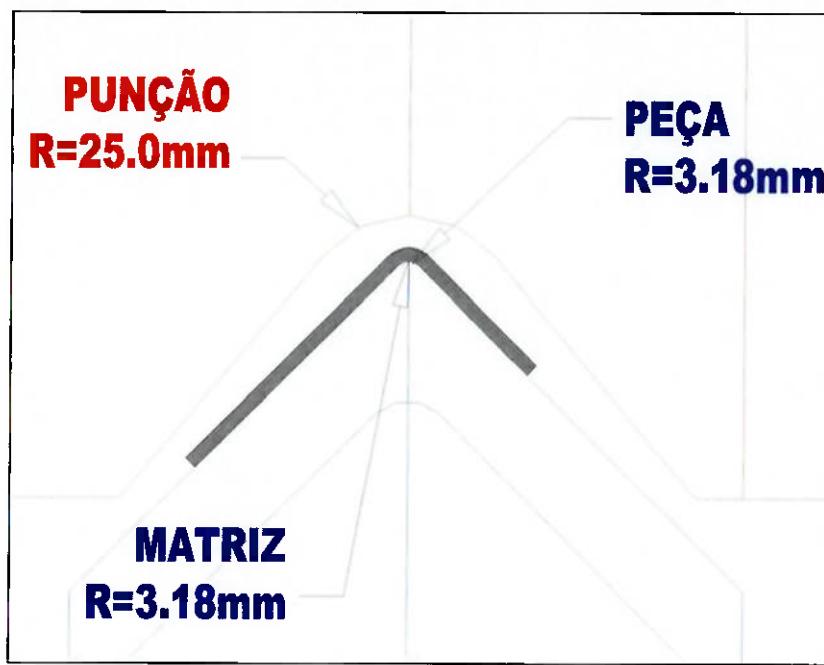
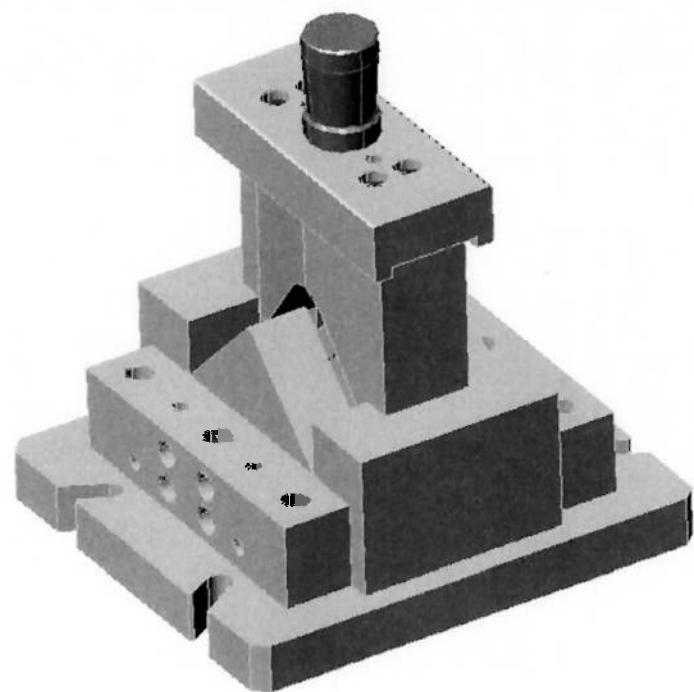


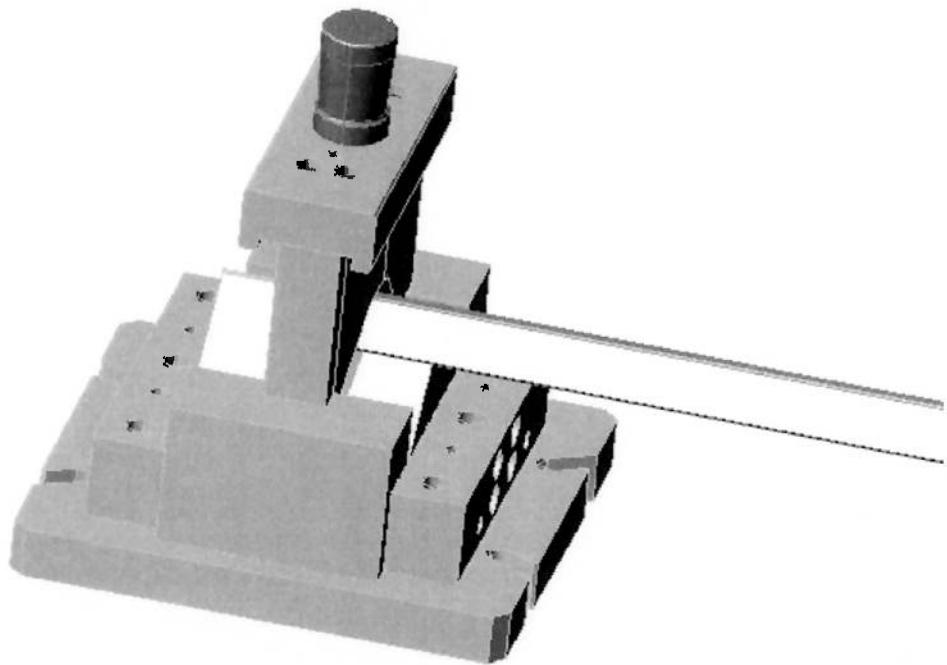
Figura 23 - Raio do Punção e raio da Matriz

- Para a perfeita fixação da peça a ser cortada, deve-se construir um dispositivo para auxiliar no apoio da mesma. Ainda para garantir o apoio da peça, o formato da matriz segue o formato da peça. Desta forma, é possível garantir um corte seguro e de qualidade.
- É necessário prever a saída do cavaco resultante deste corte, para que não haja problema de bloqueio do punção por acúmulo de material, que fatalmente acarretaria a quebra da ferramenta ou acidente. Por esse motivo, há uma abertura na parte inferior da base de apoio.

Desenhos



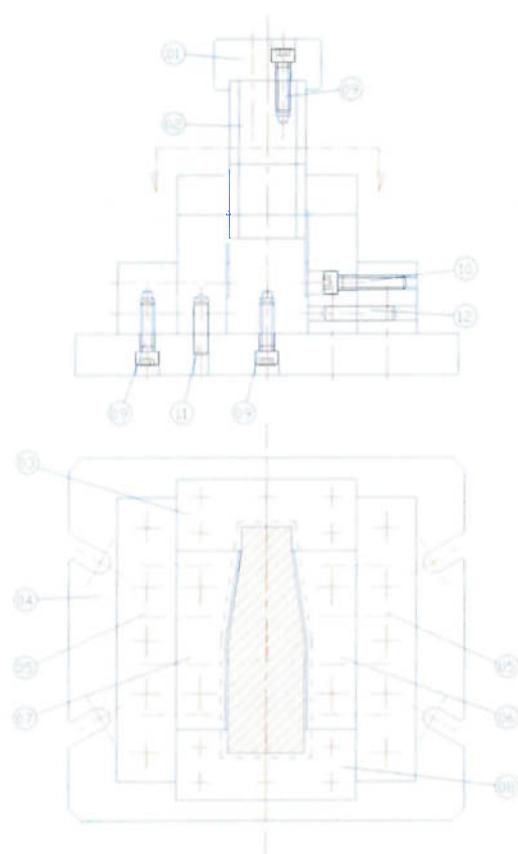
**Figura 24** - Perspectiva isométrica da ferramenta



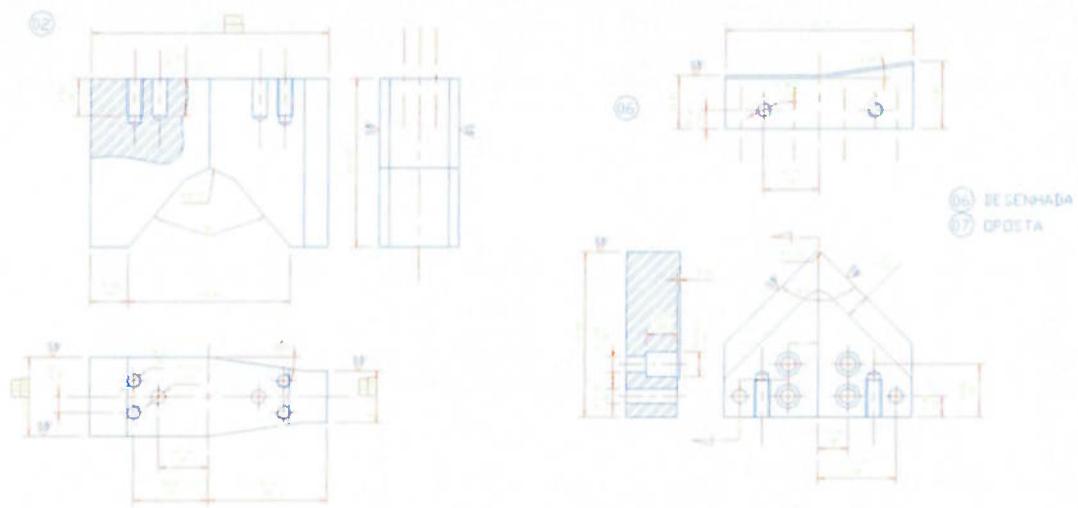
**Figura 25** - Perna do Quadro de porta posicionada na Ferramenta

ALSTOM		Ferramenta para recorte de Quadro de Porta (comprimento) - NEW JERSEY		DESENHO N°
DESENHADO	CONFIRMO	APROVADO	FILE NAME	REVISÕES
25/03/02				17200302
MARIO				
ITEM	QUANTIDADE	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	DIMENSÕES
01	01	SUporte	SAE 1020	2" x 95 x 225
02	01	PUNÇÃO	VF 800 AT	2 1/2" x 140 x 195
03	01	GUIA MENOR	SAE 1045	2 1/2" x 105 x 155
04	01	BASE	SAE 1020	1 1/2" x 310 x 340
05	01	APOIO DA MATRIZ	SAE 1020	2" x 65 x 245
06	01	MATRIZ DIREITA	VF 800 AT	1 1/2" x 140 x 155
07	01	MATRIZ EQUERDA	VF 800 AT	1 1/2" x 140 x 155
08	04	GUIA MAIOR	SAE 1045	2 1/2" x 105 x 155
09	16	PARAF CABEÇA OIL C/ SEXT. INTERNO	-	M12 x 1.75 x 40
10	08	PARAF CABEÇA OIL C/ SEXT. INTERNO	-	M12 x 1.75 x 55
11	10	PINO GUIA	SAE 1045	#12 x 45
12	04	PINO GUIA	SAE 1045	#12 x 60

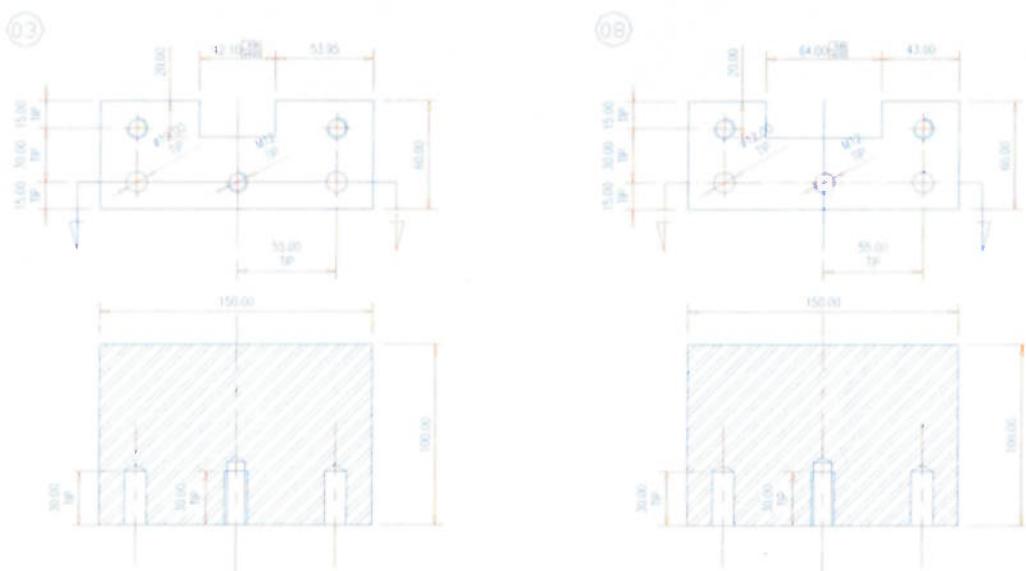
**Figura 26 - Legenda do Desenho da Ferramenta**



**Figura 27 - Desenho de Montagem da Ferramenta de Corte**



**Figura 28 - Puncão e Matrizes**



**Figura 29 - Guias do Puncão**

### Seleção de Materiais para a Ferramenta<sup>[5]</sup>

As indústrias em geral utilizam diversos critérios para selecionar seus aços para ferramentas, sendo os de maior incidência os critérios econômicos e os baseados em experiências anteriores. Tais critérios tiveram grande importância no momento em que competitividade e qualidade não tinham a importância que têm atualmente. As necessidades e a dura competição levam a uma reformulação de tais conceitos, havendo necessidade de estabelecer critérios mais técnicos, que tenham como objetivo a melhor relação custo x benefício.

Um critério bastante eficiente é selecionar o aço baseado nas necessidades mecânicas do processo de conformação a frio, focando os mecanismos de falha presentes, exceto o desgaste. Além desse, outro critério importante é a produção desejada, ou seja, a quantidade de peças que serão produzidas com esta ferramenta.

Os mecanismos de falha de uma ferramenta de conformação a frio estão diretamente relacionados com o processo utilizado, a quantidade de peças a produzir e o tipo de material a ser processado. De um modo geral, considerando-se apenas estas três variáveis conseguimos selecionar o aço mais adequado. Análises mais aprofundadas devem ser feitas em casos específicos, não fazendo parte do escopo deste projeto.

Tradicionalmente, os aços AISI-D6 e AISI-01<sup>10</sup> são os aços de referência para este segmento industrial, e até hoje são extensamente utilizados. Entretanto, especificamente para a fabricação de ferramentas para conformação a frio, é interessante observar alguns problemas graves associados a estes aços.

- O aço AISI D6 é extremamente frágil, ou seja, apresenta baixíssima tenacidade, ficando sujeito a falhas do tipo lascamento, principalmente em punções de corte, que é o caso estudado neste projeto.
- Estes aços apresentam graves problemas na aplicação dos processos de eletro erosão, seja de penetração seja a fio, devido à presença de

---

<sup>10</sup> Mais conhecidos no mercado nacional pelas designações VC131 e VND, respectivamente (ambas denominações VILLARES).

carbonetos massivos na sua microestrutura, propiciando o surgimento de trincas durante o processo.

- Ambos não permitem a aplicação de alívio de tensões eficiente, por serem revenidos a baixas temperaturas (normalmente menores que 200°C)

O material selecionado para o punção e para ambas as matrizes foi o VF800AT (denominação *Villares*). Este material pertence a uma família de aços de concepção moderna, associando a alta resistência a desgaste do aço AISI D2 com uma tenacidade mais elevada.

Para as guias optou-se pelo SAE1045, pois é um elemento que deve garantir precisão e não deve sofrer desgaste excessivo, que poderia comprometer o alinhamento da ferramenta. Uma deformação na guia pode causar desalinhamentos e posteriores danos ou acidentes graves, tendo em vista a força da prensa e as estreitas folgas entre matriz e punção.

Para os demais itens optou-se pelo SAE1020, pois não são elementos que sofrem ações cíclicas (como os punções, matrizes e guias) ou precisam garantir precisão. Estes são, em geral, elementos de fixação ou apoios.

### Tratamento Térmico<sup>[5]</sup>

O principal objetivo do tratamento térmico de aços ferramenta não é a obtenção de dureza. Na realidade, a dureza é apenas uma das consequências do verdadeiro objetivo do tratamento térmico, que é a alteração microestrutural. É através de alterações na microestrutura do material que se obtém o aumento de propriedades mecânicas desejado, em especial a tenacidade associada a elevada resistência mecânica.

Como se trata de uma ferramenta de golpe simples, a dureza destas peças deve ser de 58-60 HRC, conforme recomendação do fornecedor. Grosso modo, os tratamentos térmicos aplicados são a *têmpera* (altera a microestrutura e eleva a resistência mecânica, além de tornar o material frágil) e o *revenimento* (reduz a fragilidade resultante da têmpera e diminui a dureza do material).

As guias do punção também devem ser temperadas e revenidas devido ao contato contínuo com o punção. Para o aço SAE1045, a dureza estipulada foi de 48-50 HRC. Desta forma, o desgaste destas guias é reduzido e há maior confiabilidade neste sistema.

### **Execução da Ferramenta**

A partir do projeto descrito anteriormente, foi realizada a execução da ferramenta em empresa terceirizada devido à sobrecarga da ferramentaria da empresa. A ferramenta pronta pode ser vista nas figuras a seguir:



**Figura 30 - Ferramenta de Corte instalada na Prensa**



**Figura 31 - Ferramenta de Corte instalada na Prensa**

### Dispositivo para fixação

O sistema de fixação consiste de um prensa-chapa adaptado para prender a peça o mais próximo possível da posição de corte. Para tanto foram utilizados grampos de fixação presos à base da máquina, com uma peça com o perfil do encosto da peça, presa à ponta do fixador. O dispositivo de fixação, com acionamento manual, pode ser visto na Figura 32.

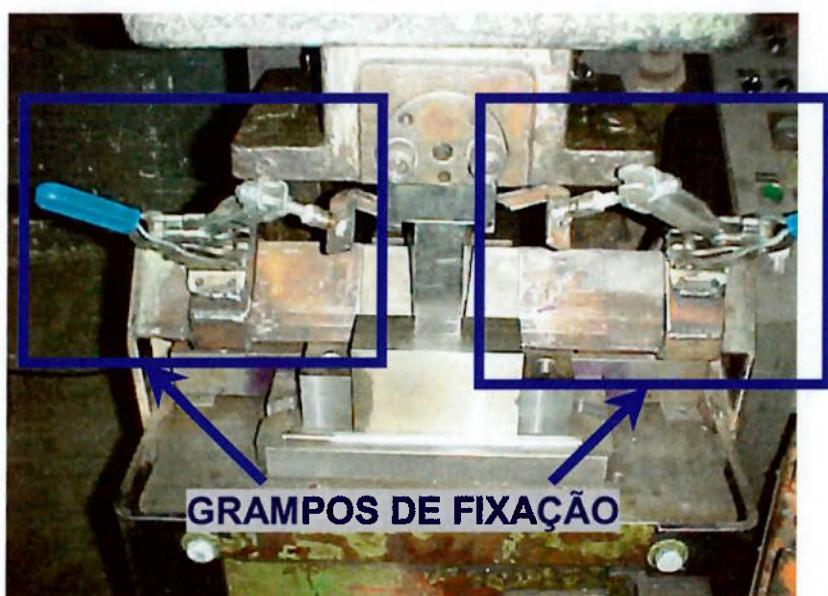


Figura 32 - Ferramenta de Corte e Dispositivos de Fixação

Para o acionamento é utilizada botoeira bimaterial de tal forma que o operador não tenha a chance de colocar as mãos na região da ferramenta, no momento do acionamento.

## 7. ENSAIOS E HOMOLOGAÇÃO

### Tomada de tempos após a implantação do novo sistema

**Tabela 4 - Tempo de operação após implantação do sistema de corte a frio**

	<i>Operação</i>	<i>Local</i>	<i>Tempo (min)</i>
1	Transporte, da estante para a bancada B.4, de pernas e peças para soldar.		1,0
2	Soldar a peça 20082.42.031 (ângulo reto) na perna (20082.42.072/073), com a máquina de solda a arco.	B.4	11,0
3	Transportar a perna para a bancada B.5		1,0
4	Soldar as peças 20082.42.029 (ângulo oblíquo), utilizando a máquina de solda a arco. Procedimento para duas pernas.	B.5	8,0
5	Transportar as pernas para o cavalete C.2		1,0
6	Transportar do cavalete C.2 para a bancada B.7 ou B.8		1,5
7	Desempenar. Duas pernas	B.7 ou B.8	12,0
8	Transportar da bancada B.8 para a bancada B.10		0,5
9	Lixar, com a lixadeira suspensa, os excessos de solda.	B.10	28,0
10	Cortar a perna (comprimento), com auxílio de gabarito.	B.10	8,0
11	Transportar da bancada B.10 para a bancada B.7 ou B.8		1,0
12	Lixar o excesso de solda que ainda resta, com lixadeira manual.	B.7 ou B.8	4,0
13	Transportar da bancada B.7 ou B.8 para o cavalete C.1		1,5
14	Transportar do cavalete C.1 para B.1, B.2 ou B.3, dependendo do modelo.		1,0
15	Soldar as pernas direita e esquerda (e outras peças, dependendo do modelo) para fechamento.	B.1, B.2 ou B.3	47,0 fechada 29,0 aberta
16	Transportar de B.1, B.2 ou B.3 para B.6		1,0
17	Refilar a perna do quadro de porta utilizando a ferramenta de corte a frio na prensa.	PRENSA	15,0 fechada 10,0 aberta
18	Desempenar	B.6	10
19	Transportar de B.6 para a Lixadeira de fita fixa.		2,0
20	Primeira etapa do acabamento interno.	Lixadeira de Fita	31,0
21	Transportar da Lixadeira de Fita fixa para a bancada B.9.		0,5
22	Segunda etapa do acabamento, com uma lixadeira manual.		48,0
23	Transportar para lixadeira de fita de mesa.		4,0
24	Acabamento externo.	Lixadeira de bancada	15,0
<b>Tempo total</b>			253 fechada 230 aberta

Para que seja possível utilizar o processo proposto na linha de produção, é necessário que este seja devidamente testado e aprovado segundo critérios de qualidade, segurança e produtividade exigidos pela empresa.

Para o caso desta ferramenta, foram realizados testes utilizando as situações normais de trabalho. Através da sua execução, foi necessário realizar uma nova medição de tempos das etapas alteradas, mostrada na tabela anterior e então uma análise confrontando os resultados dos dois diferentes processos.

#### Operação de corte da perna do quadro de porta

A partir dos tempos tomados para as operações alteradas (operação #17), é possível criar um gráfico, comparando os tempos de produção no processo antigo e os tempos atuais de produção.

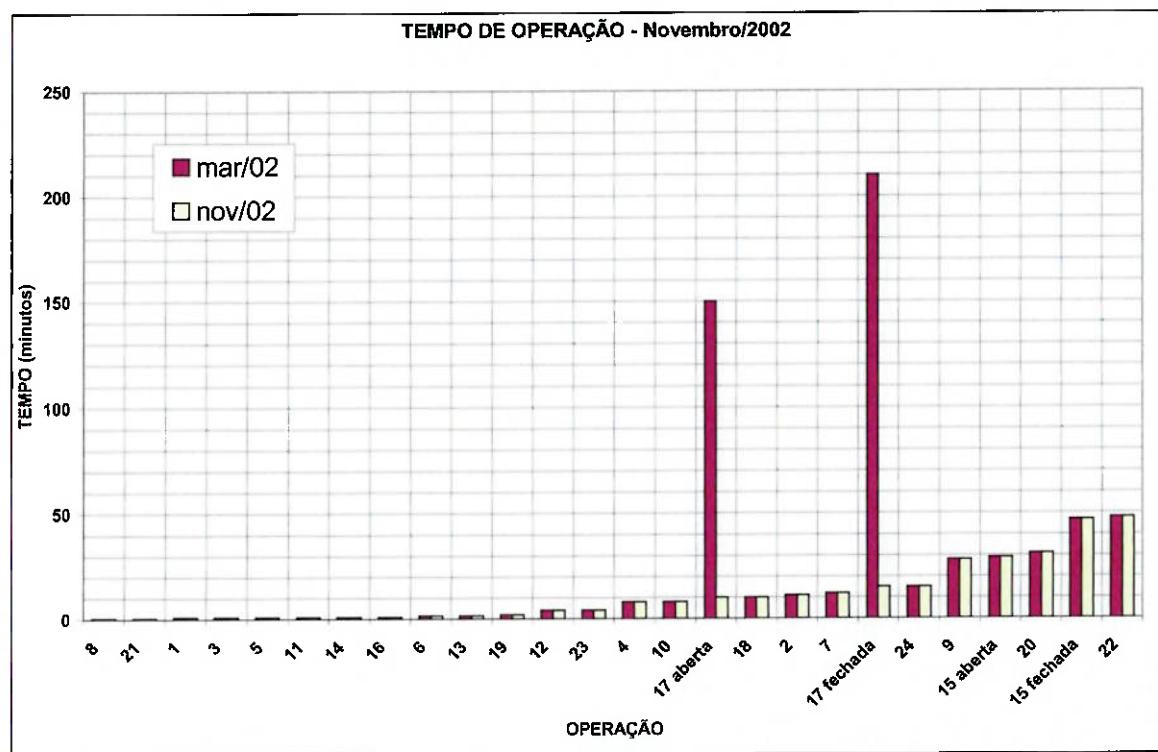


Figura 33 – Gráfico de tempos de Operação (nov/02)

A operação que antes era a mais crítica atualmente se mostra bastante eficiente, uma vez que houve uma redução muito significativa no seu tempo de execução. Esta operação era realizada em 210 minutos para quadro de porta fechado e 150 minutos para o quadro aberto. Atualmente estes valores foram reduzidos para 15 minutos e 10 minutos, respectivamente. Logo, a redução foi de 92,9% para a fechada e 93,3% para a aberta.

#### Tempo Total de fabricação

A partir de nova tomada de tempo para a operação alterada, bem como para as demais operações, é possível perceber que o tempo total de produção foi significativamente reduzido. A redução correspondente foi da seguinte ordem:

**Tabela 5 – Comparação entre os tempos totais de fabricação**

	<b>MAR/02</b>	<b>NOV/02</b>	<b>Variação</b>
Quadro de Porta fechado	448	253	-43,5%
Quadro de Porta aberto	360	230	-36,1%

## 8. CONCLUSÃO

O projeto foi concluído com sucesso, atingindo as metas de otimização do processo e redução de tempo de produção. A partir das tomadas de tempo realizadas após a implantação do novo processo, constata-se que o ganho foi significativo. A redução de mais de 40% na fabricação destas peças (combinando os dois tipos de quadro de porta) reflete diretamente em ganho de produtividade e consequente redução nos custos de produção.

A criação de uma ferramenta para corte a frio deve levar em conta todos diversos aspectos: desde a geometria do corte até o tipo de tratamento térmico ou dispositivo de fixação utilizado. Todos estes fatores somados garantem a confiabilidade na ferramenta gerada, diminuindo a chance de acidentes e aumentando sua eficiência.

Os aspectos da linha de produção também devem ser levados em consideração. A criação de uma ferramenta capaz de realizar o corte nos dois tipos de peça sem que houvesse necessidade de ajustes contribuiu na redução do tempo de fabricação do quadro de porta. Desta forma foi eliminada a necessidade de mudar de ferramenta de posição, que é um processo demorado (tempo morto) e que pode ocasionar erros de ajuste.

## **9. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A realização de um projeto de otimização de processos é de grande importância para a melhoria contínua de produtividade e qualidade, independentemente do tipo de empresa em questão. Este tipo de análise deve ser feito constantemente, uma vez que a tecnologia no domínio dos processos de fabricação ou dos materiais está em constante e contínuo desenvolvimento.

Analizando o caso específico da ferramenta projetada, é possível que se faça o mesmo para cortar outros perfis utilizados na fabricação dos vagões. Além disso, também é possível e necessário que haja um acompanhamento e aperfeiçoamento do processo implementado, buscando a melhoria contínua.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] EARY, Donald F. REED, Edward A. *“Techniques of Pressworking Sheet Metal: an engineering approach to die design”*. Prentice Hall. 2<sup>nd</sup> Edition. New Jersey. 1978.
- [2] LASCOE, O.D.. *“Handbook of Fabrication Processes”*. Ed. Carnes. Ohio. 1988.
- [3] CHAPEAUCOU, Robert *“Techniques d'amélioration continue en Production: 33 méthodes et outils pour développer les savoir-faire”*. 1<sup>ère</sup> Ed. Dunod. Paris. 1998.
- [4] BITZEL, Hubert. *“The Fascinating world of Sheet Metal”*. 1<sup>st</sup> Ed. TRUMPF GmbH. Stuttgart. 1996.
- [5] YOSHIDA Shun. *“Seleção de Aços, Tratamentos Térmicos e Engenharia de Superfícies para Ferramentas de Conformação de Metais”*. BRASIMET. São Paulo. 2001.
- [6] DEGARMO, E. Paul, BLACK, J.T., KOHSER, Ronald A. *“Materials and Processes in Manufacturing”*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- [7] KAMINSKI, P. C. *“Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade”*. 1<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro. Livros técnicos e científicos editora. 2000.
- [8] TSELIKOV,A.I. SMIRNOV,V.V. *“Rolling Mills”*. 1st edition. Moscow. Pergamon. 1965.
- [9] STIPKOVIC, M. *“Prensas, Tesouras e Ferramentas”*. São Paulo. EPUSP.