

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CENTRO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PABLO BUFFON BENEVENUTO

**ESTUDO DE ESTAMPAGEM A MORNHO NO AÇO INOXIDAVEL AISI 301
APLICADO A UM DIAFRAGMA**

CAXIAS DO SUL

2013

PABLO BUFFON BENEVENUTO

**ESTUDO DE ESTAMPAGEM A MORNO NO AÇO INOXIDAVEL AISI 301
APLICADO A UM DIAFRAGMA**

Relatório de Estágio II, com o objetivo de aprovação para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no curso de Engenharia Mecânica, apresentado a Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2013

PABLO BUFFON BENEVENUTO

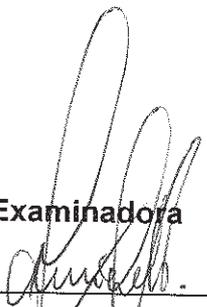
ESTUDO DE ESTAMPAGEM A MORNO NO AÇO INOXIDAVEL AISI 301
APLICADO A UM DIAFRAGMA

Relatório de Estágio II, com o objetivo de aprovação para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no curso de Engenharia Mecânica, apresentado a Universidade de Caxias do Sul.

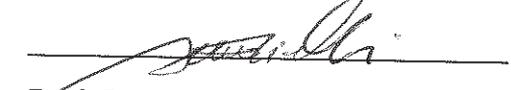
Supervisor: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

Aprovado em : 03 de dezembro, 2013

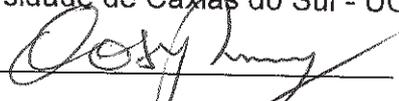
Banca Examinadora



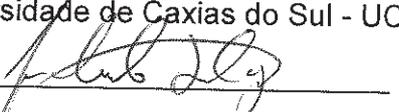
Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Dr. Alexandre Viecieli
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Dr. José Luiz Ferrarini
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Sr. Gian Delagustinho

Orientador de Estágio

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi alterar o processo de fabricação de um diafragma estampado a frio para o processo de estampagem a morno. Essa alteração de processo tem como intenção evitar a fratura do componente durante a sua fabricação, que ocorre quando a temperatura ambiente é inferior a 10°C. Através dos conhecimentos adquiridos durante a revisão bibliográfica, foi verificada que a transformação martensítica induzida no aço inoxidável AISI 301 é um dos principais fatores responsáveis pela fratura do diafragma. A transformação martensítica induzida ocorre em função da temperatura e das tensões exercidas sobre o material. Anteriormente, para viabilizar a fabricação do diafragma em condições de baixa temperatura, era necessário reduzir as tensões durante o processo de estampagem, conseqüentemente gerando desvios dimensionais no componente, ocasionando problemas na sua montagem. Visando eliminar essas dificuldades, foi construído um protótipo para realizar o aquecimento da chapa, evitando a transformação martensítica induzida no material, e por conseguinte a fratura do componente, como verificado no atual status da literatura. Também foram realizados ensaios para confirmar as propriedades químicas e mecânicas do material, a fim de examinar se o material atende os requisitos determinados pela empresa.

Palavras-chaves: Estampagem à morno, Aço inoxidável AISI 301, Transformação martensítica induzida.

ABSTRACT

The objective of this essay was to change the cold stamping process for a warm stamping process used to produce a diaphragm. The changing of that process intends to avoid the component fracture that may happen during its fabrication, when the environmental temperature is under 10°C. Using the knowledge acquired during the bibliographic review, it was verified that the induced martensitic transformation of the stainless steel AISI 301 is one of the main responsible factors for the component fracture. The induced martensitic transformation occurs due to temperature and stress that the material is submitted. Previously, to enable the component fabrication in low temperature condition, it was necessary to reduce the stress during stamping process, consequently generating dimensional deviations in the component, causing problems in its assembly. To eliminate those difficulties, a tool prototype was produced, in order to perform the warming of the plate, with the intention of avoiding induced martensitic transformation and therefore the fracture of the component, as verified in the currently literature status. Also, tests were conducted to check the chemical and mechanical properties of the material, as means to examine if the material meets the specifications determined by the enterprise.

Keywords: Warm stamping, Stainless Steel AISI 301, Induced martensitic transformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diafragma EAP047.....	1
Figura 2 – Conjunto hidráulico.....	2
Figura 3 – Ferramenta VF407.....	3
Figura 4 – Diafragma EAP047 fraturado.....	3
Figura 5 – Estruturas cristalinas encontradas no AISI 301.....	6
Figura 6 – Transformação martensítica induzida por defeito de empilhamento.....	7
Figura 7 – Diagrama de transformação martensítica induzida.....	8
Figura 8 – Efeito da temperatura sobre a transformação martensítica induzida.....	9
Figura 9 – Parâmetros que influenciam o processo de estampagem.....	11
Figura 10 – Representação da ferramenta aquecida por resistências.....	15
Figura 11 – Coeficiente de formação de martensita induzida.....	15
Figura 12 – Aumento da relação de estampagem devido à temperatura.....	16
Figura 13 – Diagrama relação de estampagem em função da temperatura.....	17
Figura 14 – Sistema de extração para ferramentas de duplo efeito.....	18
Figura 15 – Geometria do componente.....	19
Figura 16 – Relações de Δh	20
Figura 17 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.....	22
Figura 18 – Montagem entre matriz, componente e punção.....	24
Figura 19 – Área de contato entre matriz e componente.....	24
Figura 20 – Dimensões do guia antigo.....	25
Figura 21 – Projeto do novo guia.....	26
Figura 22 – Montagem do novo guia na ferramenta.....	28
Figura 23 – Resfriamento da tira.....	29
Figura 24 – Teste 50°C.....	29
Figura 25 – Teste 80°C.....	30
Figura 26 – Dispositivo do teste de vida do conjunto diafragma.....	31
Figura 27 – Ensaio de tração.....	33
Figura 28 – Ensaio de dureza.....	34
Figura 29 – Espectrômetro de raios-x Shimadzu modelo EDX-720.....	35
Figura 30 – Gráfico do diâmetro de $31,69\pm 0,02$ mm à temperatura 15°C.....	37
Figura 31 – Gráfico do diâmetro de $31,69\pm 0,02$ mm à temperatura 50°C.....	37
Figura 32 – Gráfico do diâmetro de $31,69\pm 0,02$ mm à temperatura 80°C.....	38
Figura 33 – Gráfico da altura de $0,64\pm 0,05$ mm à temperatura de 15°C.....	39
Figura 34 – Gráfico da altura de $0,64\pm 0,05$ mm à temperatura de 50°C.....	39
Figura 35 – Gráfico da altura de $0,64\pm 0,05$ mm à temperatura de 80°C.....	40
Figura 36 – Gráfico da altura de $0,79\pm 0,05$ mm à temperatura de 15°C.....	41
Figura 37 – Gráfico da altura de $0,79\pm 0,05$ mm à temperatura de 50°C.....	41
Figura 38 – Gráfico da altura de $0,79\pm 0,05$ mm à temperatura de 80°C.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos de liga dos aços Inoxidáveis AISI 301 e AISI 304.....	10
Tabela 2 – Efeito do encruamento sobre o aço inoxidável AISI 301.....	10
Tabela 3 – Requisitos mecânicos do material.....	19
Tabela 4 – Requisitos químicos do material.....	20
Tabela 5 – Cálculos comparativos de troca de calor.....	23
Tabela 6 – Cálculo da resistência.....	27
Tabela 7 – Resultados ensaio de tração.....	43
Tabela 8 – Resultados da obtenção da curva de Hollomon.....	43
Tabela 9 – Resultados teste de composição química.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CFC	Cúbica de face centrada
CCC	Cúbica de corpo centrado
EM	Especificação de material
HC	Hexagonal compacta
HRC	<i>Hardness Rocwell C</i>
IE	Instrução de engenharia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Md	Temperatura abaixo da qual ocorre a transformação martensítica por deformação
Ms	Temperatura de início de transformação martensítica sob resfriamento
M _{sσ}	Temperatura limite onde a nucleação da martensita é gerada apenas com tensão aplicada na região de deformação plástica da austenita
NBR	Norma brasileira
TCC	Tetragonal de corpo centrado

LISTA DE SIMBOLO

30T	Dureza Rockwell superficial medida com peso de 30 quilogramas força
A	Área de contato para transferência de calor condutiva
C	Carbono
C	Constante plástica de resistência
c	Calor específico do material
Cr	Cromo
D	Diâmetro da geratriz
d	Diâmetro da peça
e	Espessura do material
Fe	Ferro
h	Altura da deformação
k	Condutividade térmica do material
Kf	Tensão de escoamento
L	Espessura de troca de calor
M	Massa
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
n	coeficiente de encruamento
Ni	Níquel
P	Fósforo
Q	Taxa de transferência de calor condutiva
S	Enxofre
Si	Silício
t	Tempo desejado para o aquecimento
T1	Temperatura final
T2	Temperatura inicial
α	Martensita tetragonal de corpo centrado
α'	Martensita Cúbica de corpo centrado
β	Relação de estampagem
β_{0max}	Relação de estampagem máxima
Δh	Varição de altura
ΔT	Varição de temperatura
ϵ	Martensita Hexagonal centrada
φ	Deformação verdadeira

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO DO TEMA.....	1
1.1.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.2.	OBJETIVO.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1.	MATERIAL DO COMPONENTE.....	5
2.2.	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENITICOS.....	5
2.2.1.	Aço inoxidável AISI 301.....	6
2.2.2.	Efeito da martensita induzida.....	9
2.3.	ESTAMPAGEM.....	11
2.3.1.	Curva de Hollomon.....	13
2.3.2.	Estampagem a morno em aços inoxidáveis austeníticos.....	13
3.	DESENVOLVIMENTO.....	18
3.1.	PROCESSO ANTERIOR.....	18
3.2.	METODOLOGIA.....	21
3.2.1.	Seleção do método de aquecimento do material.....	23
3.2.2.	Desenvolvimento do aquecimento através do guia da tira.....	25
3.2.3.	Teste de aquecimento da tira.....	28
3.2.4.	Teste de vida conjunto diafragma.....	30
3.2.5.	Análise dimensional do diafragma.....	32
3.2.6.	Ensaio de tração.....	32
3.2.7.	Ensaio de dureza.....	33
3.2.8.	Teste da composição química do material.....	34
4.	RESULTADOS.....	36
4.1.	RESULTADO DO TESTE DE VIDA DO COMPONENTE.....	36
4.2.	RESULTADO DO ESTUDO DIMENSIONAL DO COMPONENTE.....	36
4.2.1.	Análise dimensional do diâmetro de $31,69\pm 0,02$ mm.....	36
4.2.2.	Análise dimensional da altura de $0,64\pm 0,05$ mm.....	38
4.2.3.	Análise dimensional da altura de $0,79\pm 0,05$ mm.....	40
4.3.	RESULTADO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	43
4.4.	RESULTADO ENSAIO DE DUREZA.....	44
4.5.	RESULTADO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL.....	44
5.	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS.....	48
	ANEXO A – REGISTRO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	49
	ANEXO B – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA.....	50

ANEXO C – RESULTADO TESTE COMPOSIÇÃO QUIMICA DO MATERIAL.....	54
ANEXO D – PROJETO DO GUIA.....	55

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o aço inoxidável vem sendo utilizado amplamente na indústria devido a sua alta resistência a corrosão, boa tenacidade e boa resistência mecânica. Os aços inoxidáveis podem ser divididos em: aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Essas divisões são determinadas devido às microestruturas encontradas em cada classe deste material.

Das classes citadas anteriormente, a que será abordada neste trabalho é a classe dos aços inoxidáveis austeníticos, com foco no aço inox AISI 301. Este tipo de aço tem como uma de suas principais aplicações a fabricação de diafragmas.

A fabricação de diafragmas usualmente se dá pela conformação mecânica à frio. Porém, muitas destas peças apresentam formas e dimensionais complexos que dificultam o processo de conformação. Estas dificuldades podem ser traduzidas como defeitos dimensionais e até mesmo fratura do componente. Uma das soluções possíveis para estes defeitos é o processo de conformação a morno.

O diafragma, alvo do estudo apresentado neste trabalho, é um componente mecânico fabricado com aço inoxidável AISI 301. O mesmo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Diafragma EAP047



Fonte: Autor (2013)

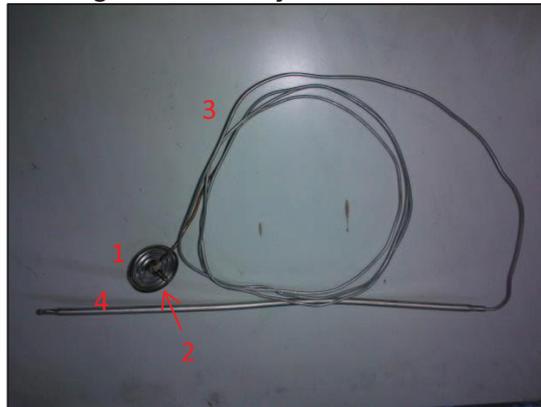
A função deste componente é realizar o acionamento mecânico do termostato elétrico fabricado na Invensys Appliance Controls.

A Invensys é uma empresa multinacional situada em Caxias do Sul desde 1961, possui cerca de 700 funcionários em seu quadro atual na planta Caxias. A empresa fabrica diversos dispositivos de controle para linha branca de

eletrodomésticos. Alguns exemplos destes produtos são os termostatos, pressostatos e chaves seletoras. Suas principais marcas são Robertshaw, Eliwell e Ranco. No Brasil, possui quatro plantas sendo duas em Caxias do Sul, uma em Vacaria e uma em Manaus, além da sede administrativa em São Paulo.

O componente EAP047 é o diafragma externo do conjunto hidráulico do termostato visualizado na Figura 2. Os componentes que estão representados na figura são: 1- Diafragmas soldados, 2- Pinos de acionamento, 3- Tubo capilar e 4- Bulbo.

Figura 2 – Conjunto hidráulico



Fonte: Autor (2013).

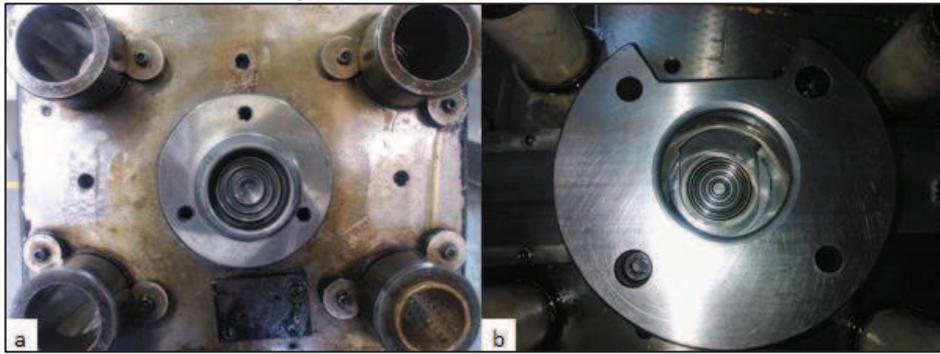
Além dos componentes apresentados na Figura 2, ainda é adicionado um fluido hidráulico no interior do conjunto, cuja função é o acionamento do termostato.

O princípio de funcionamento do termostato é a dilatação do fluido hidráulico. Com a dilatação do fluido, os diafragmas também dilatam e deslocam os pinos de acionamento, que por sua vez movem os contatos e desligam o termostato. Quando a temperatura atinge um valor abaixo da faixa determinada pelo usuário, o processo inverso acontece, assim ligando novamente o termostato.

O diafragma EAP047 é fabricado através do processo de estampagem a frio. A máquina utilizada para a estampagem do diafragma é uma prensa excêntrica Dobby 40ton – 1985.

Na Figura 3 pode-se observar o conjunto de punção (a) e matriz (b) da ferramenta. A mesma é uma ferramenta com função de duplo efeito, ou seja, apresenta corte e dobra em uma única operação.

Figura 3 – Ferramenta VF407



Fonte: Autor (2013) .

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O diafragma a ser estudado neste trabalho vem apresentando fratura quando a temperatura ambiente é inferior a 10°C. Isto vem acarretando uma reprovação de 30% do mesmo. Na Figura 4 pode ser observado o componente fraturado.

Figura 4 – Diafragma EAP047 fraturado



Fonte: Autor (2013).

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo do trabalho é substituir o processo atual de conformação a frio para um processo de conformação a morno, evitando a fratura do componente.

Para que este objetivo seja atingido pretende-se:

- a) Através de revisão bibliográfica, definir parâmetros para a implantação do novo processo;
- b) Confeccionar o protótipo de uma ferramenta para a validação do processo;

- c) Avaliar se a temperatura de estampagem tem influência sobre dimensões críticas do componente.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste estudo será avaliado o comportamento do aço AISI 301 com base no status atual da literatura, procurando-se entender o comportamento deste aço inoxidável. Através da revisão bibliográfica pretende-se encontrar informações atuais e relevantes para a solução do problema apresentado.

2.1. MATERIAL DO COMPONENTE

Para a fabricação do diafragma EAP047 é utilizada a liga de aço inoxidável AISI 301. Esta liga de aço inox tem como uma de suas principais aplicações a fabricação de diafragmas (ELINOX, 2013). Isto se deve ao fato de que o aço AISI 301 tem o maior retorno elástico dos aços inoxidáveis austeníticos (SIDERAÇOS FITAS, 2013). Este retorno elástico é desejável para esta aplicação, pois não permite que o material ultrapasse a zona de deformação linear para a zona de deformação plástica em trabalhos com temperatura elevada (PELLISSARI; MOREIRA, 2010).

O diafragma também deve apresentar resistência à corrosão. Cujas características são atendidas pelo aço AISI 301 (MESQUITA; RUGANI, 1997).

2.2. AÇOS INOXIDAVEIS AUSTENITICOS

São denominados aços inoxidáveis austeníticos os aços que apresentam matriz austenítica mesmo em temperatura ambiente (SANTOS, 2008). Por meio do diagrama Ferro-Carbono sabe-se que a austenita é estável somente nas temperaturas entre 850°C a 1400°C (CALLISTER, 2002). Porém, o que mantém a austenita estável nos aços inoxidáveis austeníticos são elementos de liga como o níquel, cobre, manganês e o cobalto. Estes elementos são conhecidos como estabilizadores da austenita (SANTOS, 2008).

Dentre as principais ligas dos aços inoxidáveis austeníticos estão os aços: AISI 301, AISI 304, AISI 304L, AISI 316 e AISI 316L (STEELSUL, 2013).

2.2.1. Aço inoxidável AISI 301

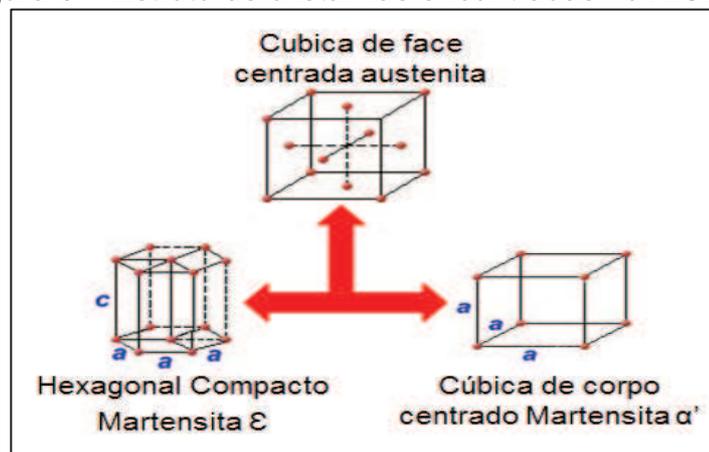
Os principais elementos de liga são Carbono, Manganês, Cromo e Níquel. Esta liga tem como principais aplicações: fins estruturais, indústria alimentícia, ferroviária, aeronáutica, fabricação de diafragmas e estampagem profunda em geral (STEELSUL, 2013).

Por ser um aço inoxidável austenítico, o AISI 301 não pode ser endurecido através de tratamento térmico. O mecanismo de endurecimento utilizado para este aço é o encruamento via deformação plástica. Adicionalmente ao encruamento ocorre o endurecimento através da transformação induzida da austenita em martensita (SANTOS, 2008).

O aço inoxidável AISI 301 é considerado um aço inoxidável metaestável por possuir uma baixa energia de defeito de empilhamento. Devido a esta característica, o mesmo é sensível ao defeito de empilhamento (SANTOS, 2008; GALLÉ; MANACH; THUILLIER, 2007; DAS et al., 2011; HUANG et al., 2012; DAS; TARAFDER; CHAKRABORTI, 2011; RAJ; KUMAR; PADMANABHAN, 1999). O defeito de empilhamento pode ocorrer em função da temperatura e das tensões aplicadas no material (SANTOS, 2008).

O defeito de empilhamento é uma imperfeição local no plano cristalino do material. Esta imperfeição pode ser descrita como o empilhamento incorreto de um plano atômico na rede cristalina deste mesmo material (CETEC, 2010). Na Figura 5 pode-se visualizar as estruturas cristalinas que podem ser encontradas no aço inoxidável AISI 301 (CIMM, 2012).

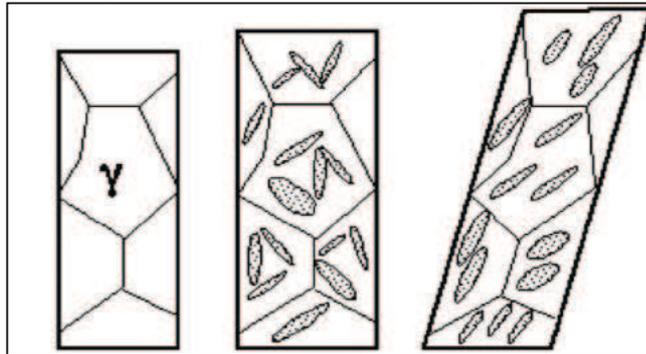
Figura 5 – Estruturas cristalinas encontradas no AISI 301



Fonte: Adaptado de Centro de informações metal mecânica (2013).

No caso do AISI 301, sua rede cristalina apresenta a sequência de empilhamento CFC (Cúbica de face centrada) (CIMM, 2012). Quando se submete o AISI 301 à tensão necessária para o material deformar plasticamente, ocorre o escorregamento dos planos cristalinos, gerando um novo empilhamento dos mesmos. Neste momento materiais que possuem baixa energia de empilhamento geram defeitos de empilhamento em sua rede cristalina. Alguns autores (SANTOS, 2008; GALLÉ; MANACH; THUILLIER, 2007; DAS et al., 2011; KRAUSS, 2005) afirmam que as falhas de empilhamento geram a transformação da austenita em martensita no material. Esta transformação ocorre quando as falhas se sobrepõem, assim formando a nucleação da martensita. Na Figura 6 pode ser observada a esquematização da transformação martensítica induzida por defeito de empilhamento.

Figura 6 – Transformação martensítica induzida por defeito de empilhamento



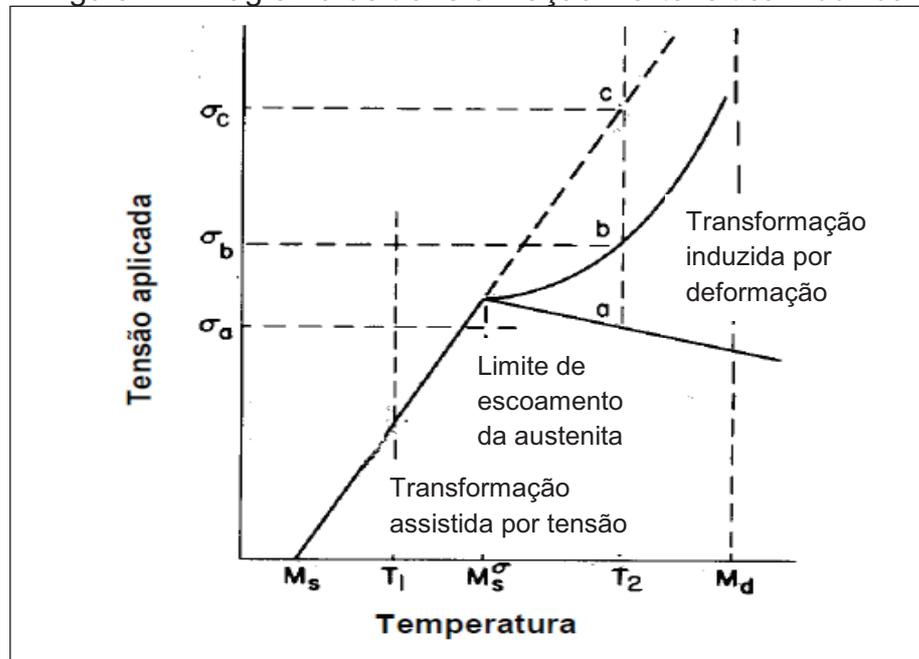
Fonte: H.K.D.H. Bhadeshia (2012)

Nos aços inoxidáveis podem-se formar martensita α' com estrutura CCC (Cúbica de corpo centrado) e a martensita ϵ com estrutura HC (Hexagonal compacta) (SANTOS, 2008; KRAUSS, 2005).

A martensita pode ser obtida simplesmente pelo resfriamento do material abaixo da temperatura M_s (Temperatura de início de transformação martensítica sob resfriamento). Acima da temperatura M_s a força motriz responsável pela transformação perde intensidade. Esta intensidade decresce linearmente com o aumento da temperatura. Quando o material está acima da M_s , a única maneira para obter martensita é através da deformação plástica ou encruamento. Como a temperatura não influi mais na força motriz do aço, a força que promove a transformação martensítica é a tensão. A tensão necessária para a transformação martensítica aumenta linearmente com o aumento da temperatura. A temperatura

M_d (Temperatura abaixo da qual ocorre a transformação martensítica por deformação) é a temperatura limite para a transformação martensítica ocorrer através da deformação. Após ultrapassar a temperatura M_d não ocorre mais a transformação martensítica (SANTOS, 2008; KRAUSS, 2005). Na Figura 7 pode-se observar o diagrama que define o fenômeno da transformação da martensita induzida. Onde, M_s é a temperatura de início de transformação martensítica sob resfriamento, M_s^σ é a temperatura limite onde a nucleação da martensita é gerada apenas com tensão aplicada na região de deformação plástica da austenita e M_d é a temperatura abaixo da qual ocorre a transformação martensítica por deformação.

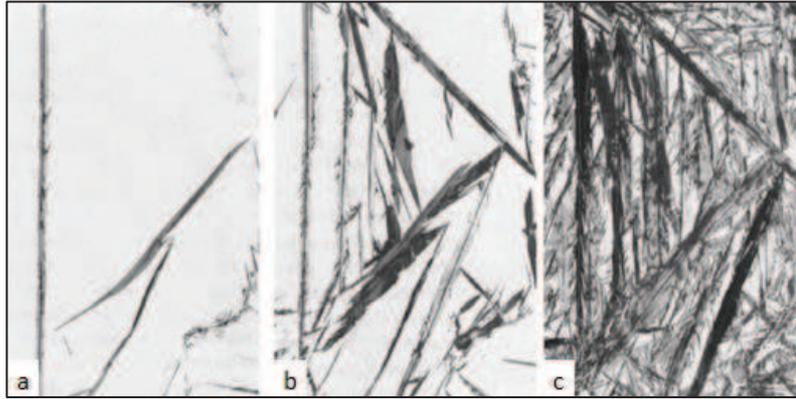
Figura 7 – Diagrama de transformação martensítica induzida



Fonte: Marta Ribeiro dos Santos (2008).

Como apresentado anteriormente, para uma mesma tensão de deformação, quanto mais baixa a temperatura que o material é conformado, mais martensita induzida será encontrada na matriz cristalina do material (SANTOS, 2008; KRAUSS, 2005). Na Figura 8 pode ser observado o efeito da temperatura sobre a nucleação da martensita induzida em um aço com matriz austenítica. Onde o material foi estampado à 24°C (a), -60°C (b) e -110°C (c).

Figura 8 – Efeito da temperatura sobre a transformação martensítica induzida



Fonte: Krauss (2005).

Ao invés da estrutura do aço inoxidável se tornar TCC (Tetragonal de corpo centrado), que é a estrutura da martensita α , a mesma se torna CCC por possuir baixa quantidade de carbono em sua estrutura, desta forma se transformando em martensita α' . A martensita ϵ é obtida em temperaturas baixas, sendo que o mecanismo para a transformação da martensita ϵ é o defeito de empilhamento. A martensita ϵ apresenta um comportamento muito instável. Alguns autores (SANTOS, 2008; KRAUSS, 2005) afirmam que a martensita ϵ se transforma em martensita α' . Esta conclusão foi confirmada através de análises metalográficas dos aços inoxidáveis plasticamente deformados. Onde a martensita α' foi encontrada entre duas placas de martensita ϵ (SANTOS, 2008).

2.2.2. Efeito da martensita induzida

Alguns autores (GALLÉ; MANACH; THUILLIER, 2007; HUANG et al., 2012; KRAUSS, 2005) afirmam que, apesar dos aços inoxidáveis AISI 301 e AISI 304 apresentarem características mecânicas diferentes, a transformação martensítica induzida para ambos os aços é semelhante. Porém o efeito desta transformação é diferente em ambos os aços. Como a liga do AISI 301 foi desenvolvida com o objetivo de favorecer o endurecimento do material pelo mecanismo de encruamento, esta liga do aço AISI 301 apresenta um percentual menor de níquel, que é o principal elemento estabilizante da austenita, do que a liga do aço AISI 304. Desta forma o AISI 301 é menos estável do que o AISI 304 (KRAUSS, 2005). Na Tabela 1 pode ser observado o percentual dos elementos de liga de ambos os aços. Onde

poder ser observado que o percentual de Ni é menor no AISI 301, em comparação ao aço AISI 304.

Tabela 1 – Elementos de liga dos aços Inoxidáveis AISI 301 e AISI 304

ABNT/ AISI	%C (máx)	%Mn (máx)	%Si (máx)	%P (máx)	%S	%Ni	%Cr	%Mo	Outros
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	6/8	16/18	-	-
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	8/10,5	18/20	-	-

Fonte: Sideraços Fitas [entre 2012 e 2013].

A martensita induzida apresenta diversos efeitos sobre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos. O primeiro efeito relevante que pode ser constatado é a variação do volume do material que ocorre durante a transformação martensítica. Quando a austenita se transforma em martensita α' o volume do material aumenta em 2,57%. Já quando a austenita se transforma em martensita ϵ o volume do material reduz em 0,81% (PADILHA; RIOS, 2002). Além disso, a martensita fragiliza o material, sendo que pode provocar ruptura instantânea do material e até mesmo o efeito denominado como *delayed cracking*. O *delayed cracking* é o fenômeno onde a ruptura do material não é instantânea, a mesma pode ocorrer dentro de horas ou até mesmo semanas após a fabricação do componente (SANTOS, 2008).

Para o aço inoxidável AISI 301 a transformação martensítica representa um aumento significativo em propriedades mecânicas como limite de escoamento e limite de resistência do material. Estas propriedades aumentam com presença do encruamento. Em compensação o alongamento do material sofre o efeito oposto, ou seja, o mesmo reduz com o aumento do encruamento (MOREIRA; LEBRÃO, 2010). Na Tabela 2 pode-se observar o efeito do encruamento neste material.

Tabela 2 – Efeito do encruamento sobre o aço inoxidável AISI 301

Encruamento	Redução da área de trefilação [%]	Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento mínimo (em 25 mm) [%]
Recozido	-	515	205	40
1/4 Duro	10 a 15	860	515	25
1/2 Duro	20	1030	760	18
3/4 Duro	30	1210	930	12
Totalmente Encruado	40	1280	965	9

Fonte: MOREIRA, Marcelo F.; LEBRÃO, Susana M. G. [entre 2010 e 2013].

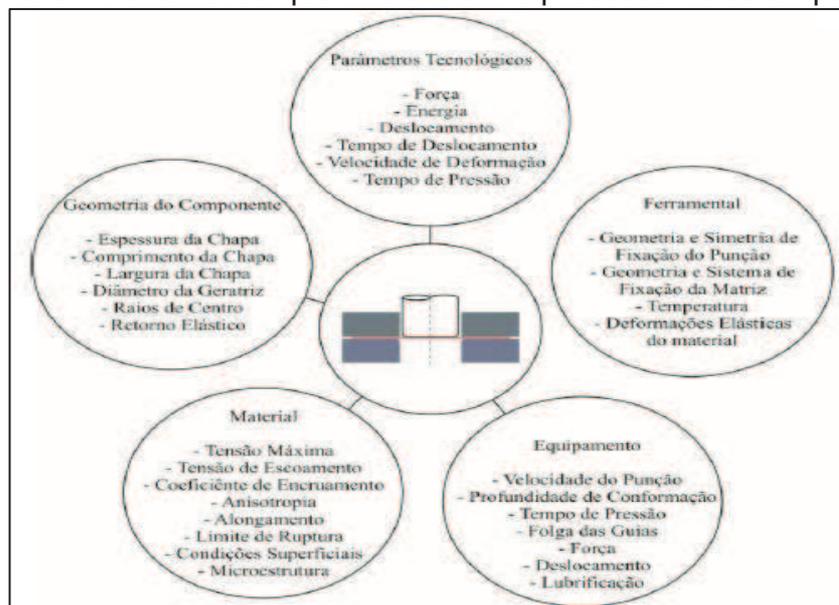
2.3. ESTAMPAGEM

A estampagem pode ser definida como conjunto de operações de conformação, realizadas com o objetivo de deformar plasticamente o material. Desta forma podem-se atingir formas e valores dimensionais pré-definidos pela ferramenta de estampo. No processo de estampagem podem ser encontradas diversas operações relacionadas à conformação dos materiais, como exemplo podem ser citadas as operações de: corte, dobramento, furação e repuxo. As ferramentas utilizadas para estas operações são prensas e ferramentas de estampo (MESQUITA; RUGANI, 1997).

A estampagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria. Suas principais vantagens são: velocidade do processo, estabilidade dimensional do produto final, obtenção de formas específicas, baixo custo da peça e peças com boa resistência mecânica devido ao encruamento (ESTAMPAGEM, 2007).

Outra característica importante do processo de estampagem é a versatilidade do mesmo em relação às matérias-primas utilizadas. Podem-se utilizar materiais como: aço carbono, aço inoxidável, ligas de cobre, ligas de alumínio, etc. Além dessa versatilidade em relação as matérias-primas, também tem-se versatilidade quanto a temperatura de trabalho, onde podem-se ter estampagem a frio, a morno e a quente (ESTAMPAGEM, 2007; RADAELLI, 2012). A estampagem pode ser influenciada por diversos fatores conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Parâmetros que influenciam o processo de estampagem



Fonte: Schaeffer (2004)

Detendo-se no parâmetro geometria do componente podem ser encontradas algumas relações de extrema importância para o processo de conformação encontrado na fabricação do diafragma. O primeiro parâmetro é o β (relação de estampagem). Este parâmetro pode ser expresso pela Equação 1 e representa a severidade do processo de estampagem sofrida pelo componente (RADAELLI, 2012).

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Fonte: Schaeffer (2004)

Onde:

D = Diâmetro da geratriz [mm];

d = Diâmetro da peça [mm].

O processo de conformação apresenta a lei de conservação de volume, onde o material sofre mudança de geometria conservando o volume de material inicial durante o processo de conformação. A partir desta lei obtêm-se a Equação 2, onde são relacionados os diâmetros da geratriz e da peça. Além disto, nesta equação é considerado que a espessura do material não é alterada durante o processo, desta forma é obtida uma igualdade entre as áreas da geratriz e da peça. Esta equação é amplamente utilizada para encontrar o diâmetro da geratriz ou da peça em componentes com geometrias complexas (SCHAEFFER, 2011).

$$D = \sqrt{d^2 + 4 * d * h} \quad (2)$$

Fonte: Tschaetsch (2005)

Onde:

D = Diâmetro da geratriz [mm];

d = Diâmetro da peça [mm];

h = Altura da deformação [mm].

Outro parâmetro a ser considerado é o β_{0max} (relação de estampagem máxima). Este parâmetro determina qual é a relação de estampagem máxima que um componente pode sofrer sem apresentar estrição (RADAELLI, 2012). Este valor

pode ser encontrado em tabelas, porém para os aços inoxidáveis Mesquita e Rugani (1997) apresentam a Equação 3 para o cálculo do β_{0max} .

$$\beta_{0max} = 2,15 - 0,001 * \frac{d}{e} \quad (3)$$

Fonte: Mesquita, Rugani (1997)

Onde:

d = Diâmetro da peça [mm];

e = Espessura [mm].

2.3.1. Curva de Hollomon

A curva de Hollomon é uma aproximação do comportamento do material durante a deformação na região plástica. Este método é muito utilizado devido a facilidade de obtenção da curva e de sua aceitável precisão (JORGE Jr, 1997).

A partir de um ensaio de tração é obtida a curva tensão-deformação do material. A curva de Hollomon (Equação 4) procura modelar o comportamento do material na região da deformação plástica da curva tensão-deformação (MORAIS, 2000).

$$K_f = C * \varphi^n \quad (4)$$

Fonte: MORAIS, Willy (2000)

Onde:

K_f = Tensão de escoamento;

C = Constante plástica de resistência;

φ = deformação verdadeira;

n = Coeficiente de encruamento.

2.3.2. Estampagem a morno em aços inoxidáveis austeníticos

Com aumento da utilização dos aços inoxidáveis na indústria. Cada vez mais estes aços são submetidos ao processo de estampagem. Porém quando são utilizados estes materiais para a fabricação de componentes através da

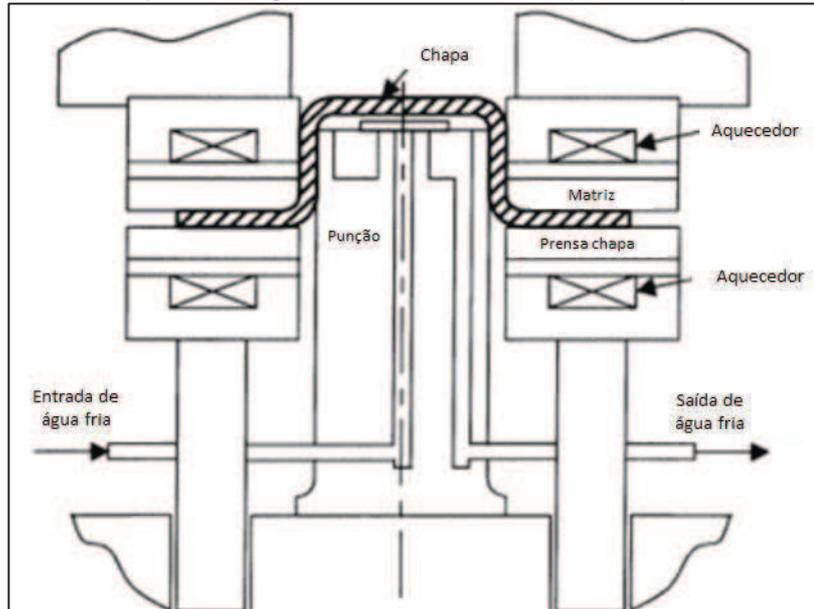
estampagem a frio, pode-se encontrar problemas resultantes da transformação martensítica induzida. A transformação martensítica já foi abordada nas seções anteriores deste trabalho. A estampagem a morno tornou-se uma das alternativas para o trabalho com aços inoxidáveis (WARM, 2006). Como explicado anteriormente o acréscimo de temperatura inibe a formação de martensita por deformação.

Com a possibilidade da estampagem à morno ser uma alternativa para a estampagem dos aços inoxidáveis austeníticos, muitos estudos passaram a ser realizados para viabilizar esta alternativa (RADAELLI, 2012). Segundo os autores as primeiras tentativas de estampagem à morno consistiam em aquecer o material em um forno e depois levar o material até a ferramenta para realizar a estampagem. Este processo apresentou certos problemas. O primeiro problema foi a oxidação que o material sofria durante o aquecimento no forno. O segundo problema foi o decréscimo da temperatura entre o trajeto forno-ferramenta. Isto acarretava um aquecimento de pelo menos 100°C acima da temperatura de trabalho pré-determinada, com o intuito de compensar o decréscimo de temperatura (RADAELLI, 2012; MORI; MAKI; TANAKA, 2010).

Outra alternativa para alcançar a estampagem a morno bastante estudada foi o processo de aquecimento por eletrodos. O processo consistia em colocar eletrodos na própria ferramenta para o aquecimento da tira. Os eletrodos ficavam fixos imediatamente antes do prensa chapa da ferramenta. Porém os eletrodos não entravam em contato com o prensa chapa, com o punção ou com a matriz da ferramenta. A intenção dos eletrodos era de reduzir o tempo entre o aquecimento do material e a conformação da peça. A dificuldade encontrada neste processo foi o aquecimento irregular do material devido ao contato entre a chapa e os eletrodos (MORI; MAKI; TANAKA, 2010).

O aquecimento da ferramenta por resistências elétricas também foi alvo de estudos. Os autores aqueceram a matriz e o prensa chapa com resistências elétricas. Para os testes foram determinadas três temperaturas: 90, 120 e 150°C. Com o aquecimento da matriz e do prensa chapa da ferramenta foi eliminado o problema de aquecimento não uniforme do material. O punção foi resfriado com circulação de água em temperatura inferior a 10°C. O punção resfriado tem por objetivo evitar a falha por escoamento no material. Na Figura 10 pode-se observar o esquema da concepção da ferramenta (TAKUDA, 2003).

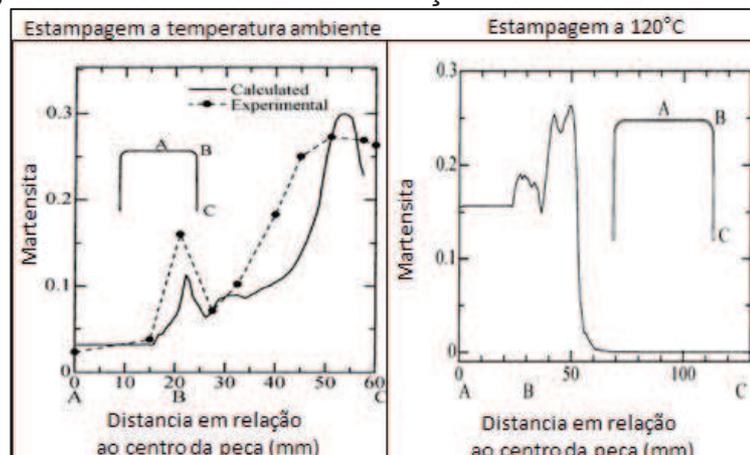
Figura 10 – Representação da ferramenta aquecida por resistências



Fonte: Adaptado de Takuda et al. (2003)

Os testes foram realizados em copos de aço inoxidável AISI 304 submetidos a estampagem profunda. Os autores utilizaram análise de elementos finitos para simular os testes. Os resultados encontrados foram bastante satisfatórios. Entre as temperaturas de estampagem de 120°C e 150°C não foram encontrados nenhum indício de fratura nos componentes. Os autores desenvolveram gráficos que demonstram o coeficiente de martensita induzida encontrada em uma peça estampada através da estampagem profunda à temperatura ambiente (Figura 11).

Figura 11 – Coeficiente de formação de martensita induzida



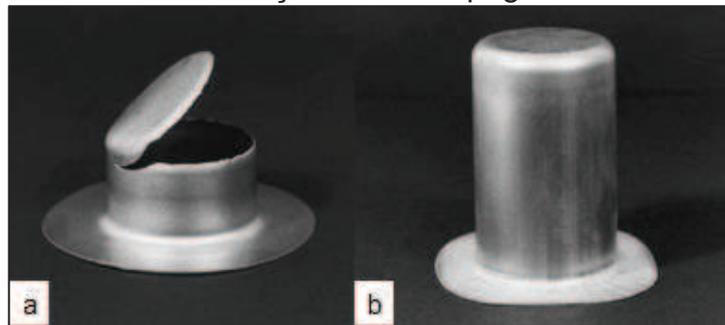
Fonte: Adaptado de Takuda et. Al (2003)

Conforme pode ser observado na Figura 11, os autores dividiram o copo estampado em três regiões. A primeira região A representa o fundo do caneco, a

região B representa a dobra do caneco e a região C, a parede do caneco. No primeiro gráfico, a peças estampada a temperatura ambiente aumenta gradativamente o percentual de martensita induzida conforme aumenta a distância com relação ao centro da peça. Assim a peça esta suscetível ao fenômeno do *delayed cracking*. Já na peça estampada a 120°C pode ser observado que a região A apresenta certa concentração de martensita induzida com um pico na região B (assim como na peça estampada à temperatura ambiente). Porém na região C a concentração de martensita induzida praticamente é inibida pelo efeito da temperatura durante a estampagem da peça.

Além de evitar a fratura causada pela martensita induzida, a estampagem a morno aumentou a relação de estampagem em relação as peças estampadas a morno comparadas as peças estampadas a temperatura ambiente conforme pode ser observado na Figura 12. Onde a) foi estampada à temperatura ambiente e fraturou com uma relação de estampagem de 2,2 e b) foi estampada à 120°C com uma relação de estampagem de 2,7 sem sofrer fratura.

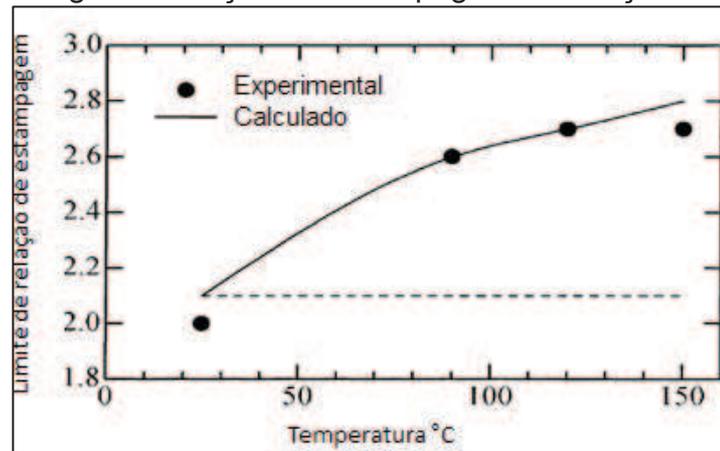
Figura 12 – Aumento da relação de estampagem devido à temperatura



Fonte: Adaptado de Takuda et. Al (2003)

O aumento da relação de estampagem devido à aplicação de temperatura foi comprovado através de cálculos desenvolvidos pelos autores. Os resultados foram compilados em no diagrama apresentado na Figura 13. Neste diagrama pode ser observado que devido ao acréscimo de temperatura a relação de estampagem também aumenta, porém quando atinge a temperatura de 120°C até 150°C a relação de estampagem se estabiliza até o rompimento da peça.

Figura 13 – Diagrama relação de estampagem em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Takuda et. Al (2003)

O resfriamento do punção também provou ser indispensável para a operação. Em testes realizados sem o resfriamento do punção, a fratura ocorria ao redor do fundo do componente onde a tensão sofrida pelo material é maior. Como citado anteriormente esta falha ocorria devido ao limite de escoamento do material diminuir com o aumento da temperatura de estampagem. Foi comprovado durante o experimento que a face da peça que entra em contato com o punção é resfriada quase que instantaneamente. Desta maneira o limite de escoamento do material se mantém estável evitando a estricção do mesmo. Através de análises metalográficas não foram encontrados resquícios de martensita induzida na matriz do material (TAKUDA, 2003).

3. DESENVOLVIMENTO

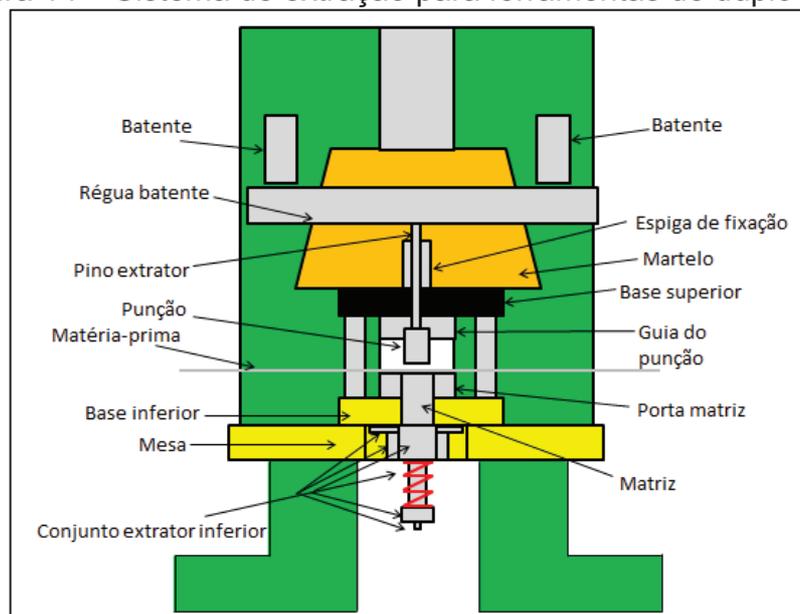
O estudo idealizado neste trabalho visou encontrar uma alternativa para amenizar a fratura sofrida durante a estampagem do diafragma EAP047 em condições ambientes de temperatura inferior a 10°C.

3.1. PROCESSO ANTERIOR

O diafragma EAP047 era estampado em um processo de estampagem a frio. A fabricação deste componente é realizada em uma ferramenta de duplo efeito. O ciclo da máquina para a produção do componente é de 1,1 s. A alimentação do material é realizada através de um alimentador automático da marca HAP modelo TBX-200 cujo passo é de 39,5 mm. O diafragma é produzido em uma prensa excêntrica de 40 toneladas da marca Dobby ano 1985.

Ferramentas de duplo efeito são ferramentas de estampagem onde o material é conformado e cortado na mesma operação. Para que este tipo de estampagem seja possível é necessário que exista extração tanto no punção quanto na matriz da ferramenta. No caso do diafragma a extração por parte da matriz é realizado através de mola e a extração no punção é realizado através de pino extrator conforme esquema da Figura 14.

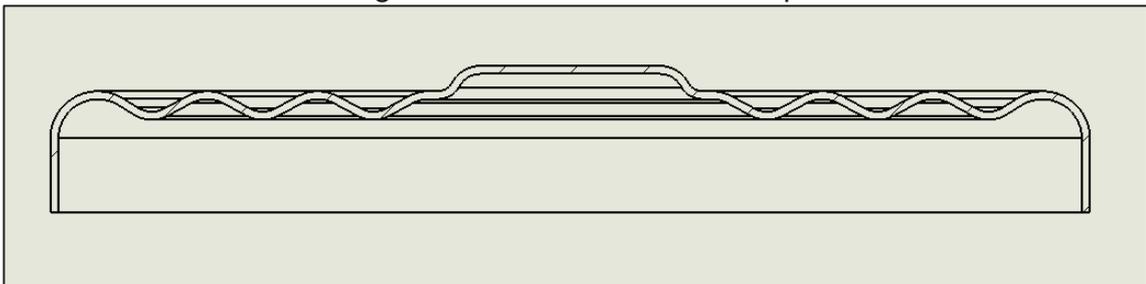
Figura 14 – Sistema de extração para ferramentas de duplo efeito



Fonte: Autor (2013).

Sabendo que o diafragma é produzido em uma ferramenta de duplo efeito o mesmo é produzido em um único estágio. Porém quando a temperatura ambiente é inferior a 10°C o componente sofre fratura entre suas ondulações. A geometria do componente pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 – Geometria do componente



Fonte: Empresa (1996).

O material base para a fabricação do diafragma EAP047 é um aço inoxidável AISI 301. Este material é recebido em bobinas na espessura de 0,25 mm com largura de 41,28 mm. A empresa classifica este material através de uma especificação de material (EM) onde é definido que este material pertence a classe número três desta especificação conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos mecânicos do material

N°	Têmpera	Limite de Escoamento 0,2% (min.)		Resistência a Tração (min.)		Alongamento em 50 mm (min.) (%)		Dureza Rockwell
		MPa	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	Espessura até 0,4	Espessura acima de 0,4	
1	Recozido	205	20,9	620	63,3	40	40	B 7 - 88
2	1/4 Duro	515	52,6	860	87,8	25	25	C 25 - 32
3	1/2 Duro	760	77,6	1035	105,6	15	18	C 30 - 43
4	3/4 Duro	930	94,9	1205	123,0	10	12	C 37 - 42
5	Duro	965	98,4	1275	130,1	8	9	C 40 - 45
6	Duro	-	-	1393 1618	142,0 165,0	8 max.	-	C 42 - 47

Fonte: Empresa (1999).

Esta especificação de material também apresenta quais são os requisitos químicos do material conforme pode ser observado na Tabela 4.

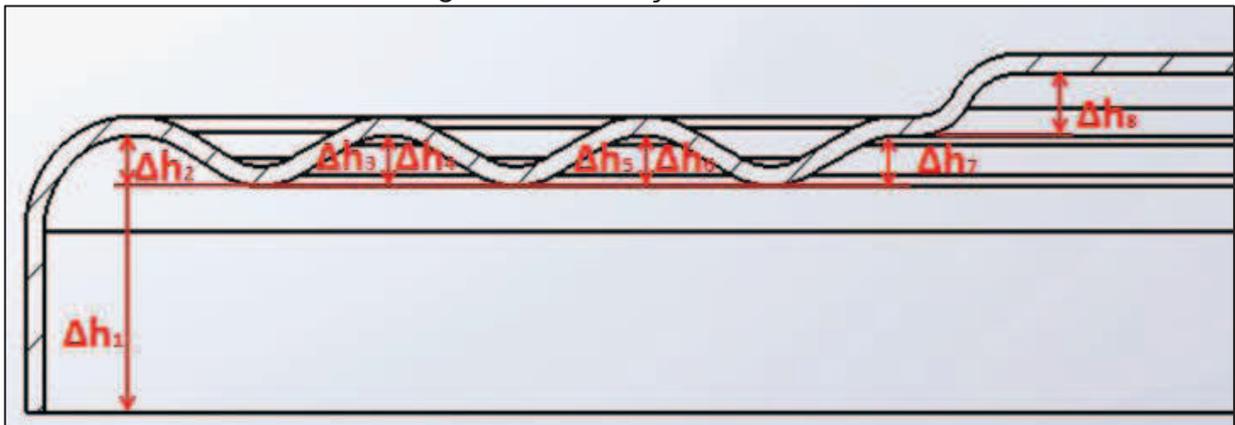
Tabela 4 – Requisitos químicos do material

Composição química (%)		Tolerância
Carbono (C)	0,15 max.	+ 0,1
Manganês (Mn)	2,00 max.	+ 0,04
Fósforo (P)	0,045 max.	+ 0,010
Enxofre (S)	0,030 max.	+ 0,005
Silício (Si)	0,75 max.	+ 0,05
Cromo (Cr)	16,00 - 18,0	± 0,20
Níquel (Ni)	6,00 - 8,00	±0,10
Ferro (Fe)	restante	-

Fonte: Empresa (1999).

A fim de verificar se a estampagem em um único estágio é viável para este componente, foi utilizada a Equação 1 para calcular a relação de estampagem do mesmo. Conforme pode ser observado na Figura 15, o componente apresenta formas geométricas complexas. Havendo alternância entre tensões de tração e compressão na face do componente devido a geometria ondulatória.

Efetuaram-se algumas considerações para o cálculo do β do componente. Utilizou-se o diâmetro real (37,7 mm) que o componente utiliza da tira como valor de geratriz. A altura total da estampagem foi obtida através da soma de todos os Δh apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Relações de Δh 

Fonte: Autor (2013)

Com os valores do diâmetro da geratriz e a altura h já obtidos, foi utilizada a Equação 2 para encontrar o valor do diâmetro equivalente da peça.

$$37,7 = \sqrt{d^2 + 4 * d * 8,16}$$

$$d \cong 24,76mm$$

Após o diâmetro equivalente da peça ser encontrado, o mesmo foi utilizado na Equação 1 para o cálculo do β do componente.

$$\beta = \frac{37,7}{24,76}$$

$$\beta = 1,52$$

Encontrando o valor de β do componente foi calculado o valor de $\beta_{0\max}$ a fim de verificar a viabilidade da estampagem em um único estágio para o diafragma utilizando a Equação 3.

$$\beta_{0\max} = 2,15 - 0,001 * \frac{24,76}{0,25}$$

$$\beta_{0\max} = 2,05$$

Assim após os cálculos dos valores de β e $\beta_{0\max}$ foi verificado que a estampagem em um único estágio é viável para o componente, pois $\beta < \beta_{0\max}$. Como foi verificado que a relação de estampagem do componente não é o fator responsável pela fratura do diafragma, a transformação martensítica induzida tornou-se a principal responsável pela fratura da peça.

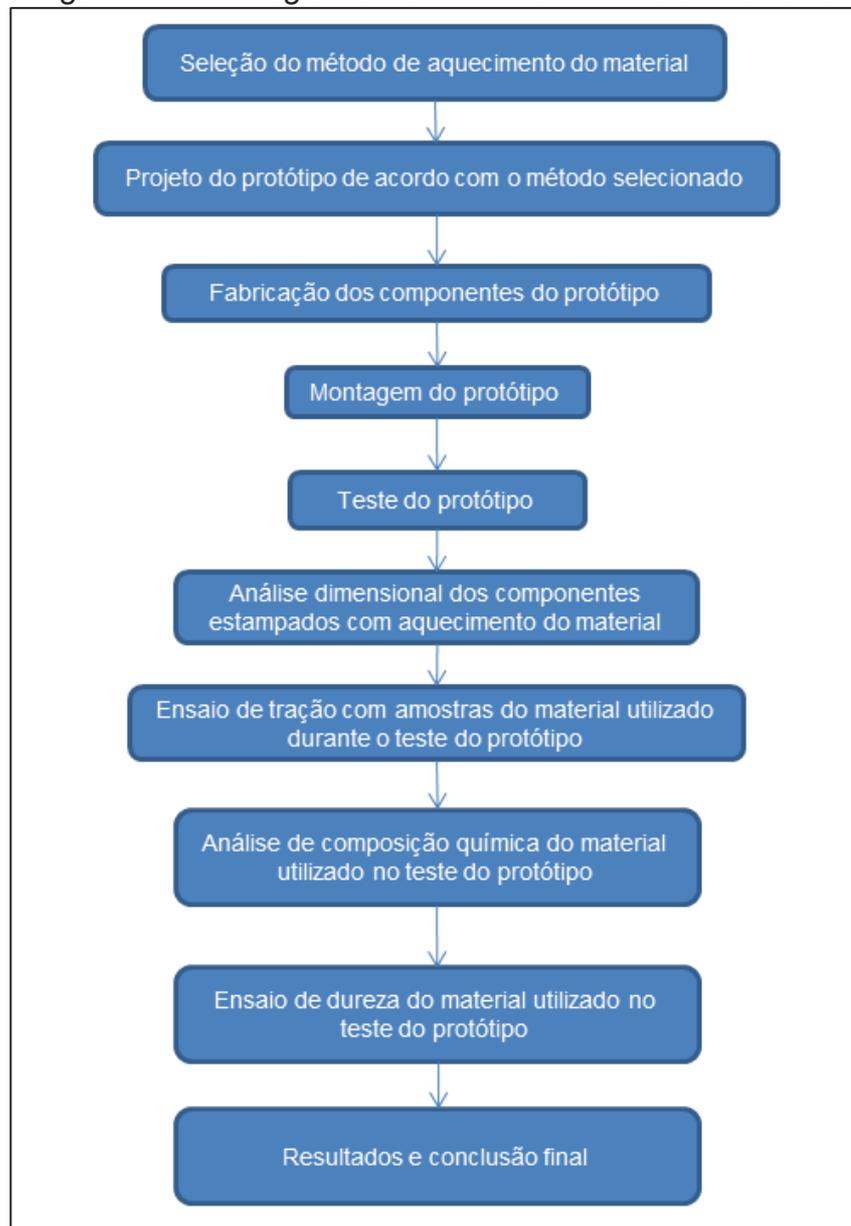
3.2 METODOLOGIA

Com o objetivo de reduzir a formação de martensita induzida no componente, idealizou-se seguir o modelo experimental de Takuda de estampagem a morno apresentado na Figura 10 deste trabalho. O novo processo de estampagem foi testado em duas temperaturas diferentes 50°C e 80°C. Estas temperaturas foram determinadas devido ao fato da temperatura crítica de fratura da peça ser aproximadamente 10°C. A temperatura de 80°C foi selecionada por ser a temperatura limite para o operador manusear a tira sem sofrer queimaduras e a temperatura de 50°C foi selecionada por ser uma temperatura intermediária.

Porém o modelo de estampagem de Takuda é diferente do processo de estampagem do diafragma e algumas adaptações foram efetuadas. A primeira diferença encontrada entre os processos foi o método de estampagem entre os componentes. No modelo de Takuda a estampagem era realizada em uma prensa

hidráulica com uma velocidade de estampagem baixa se comparada à velocidade de uma prensa excêntrica, conforme a que utiliza-se na produção do diafragma. Devido a baixa velocidade, no experimento de Takuda, existia mais tempo para troca de calor entre o material e a matriz da ferramenta, o que não ocorre na estampagem do diafragma. Outro fator que influenciou as alterações foi a geometria do componente. Conforme foi verificado na Figura 15, o diafragma não apresenta o formato de copo padrão geralmente encontrado em processos de estampagem profunda. Devido às diferenças entre os processos o desenvolvimento do projeto seguiu o fluxograma apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor (2013)

3.2.1. Seleção do método de aquecimento do material

Duas alternativas foram idealizadas para efetuar o aquecimento da chapa. A primeira seguiu o modelo experimental de Takuda com o aquecimento da matriz. A segunda alternativa proposta foi realizar o aquecimento no guia de entrada de material na ferramenta.

Para a definição do processo de aquecimento foi calculada a taxa de transferência de calor condutiva para ambos os métodos de aquecimento. Utilizou-se a Equação 5 para serem efetuados estes cálculos. Os cálculos efetuados neste estágio do projeto foram feitos apenas com o objetivo de comparar ambas alternativas de aquecimento. Desta forma foi considerado que os sistemas efetuariam o aquecimento em um sistema ideal sem perdas. Sabe-se também que a transferência de calor para o método de aquecimento da matriz não é unidimensional, porém para os cálculos comparativos este fator foi ignorado.

$$Q = k * A * \frac{\Delta T}{L} \quad (5)$$

Fonte: Incropera (2011)

Onde:

Q= Taxa de transferência de calor condutiva;

k= Condutividade térmica do material;

A= Área de contato;

ΔT = Variação de temperatura;

L = Espessura.

Na Tabela 5 podem ser observados os dados utilizados nos cálculos e os resultados das equações.

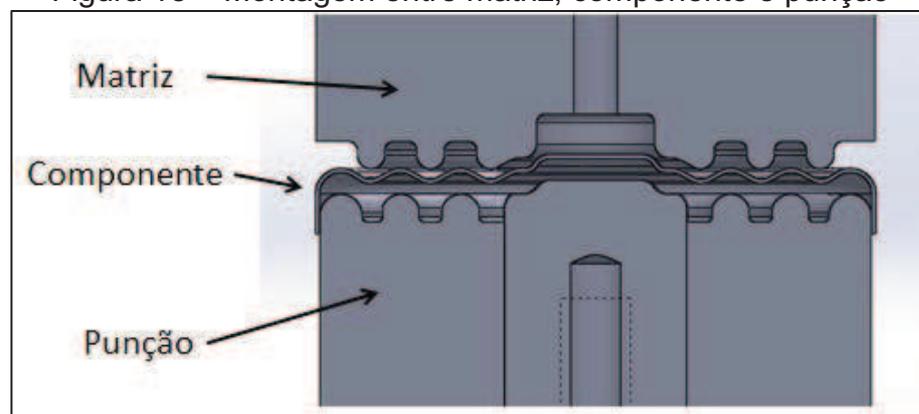
Tabela 5 – Cálculos comparativos de troca de calor

Dados	Aquecimento da Matriz (Takuda)	Aquecimento do guia de entrada da tira
ΔT (K)	80	80
L(m)	0,00025	0,00025
k (W/m*K)	14,65	14,65
A (m ²)	0,0000262	0,000326
Q (W)	132,2	1528,29

Fonte: Autor (2013)

Como pode ser observado na Tabela 5, o valor da área de transferência de calor é diferente para ambos os métodos de aquecimento. Isto acontece devido ao modelo de Takuda aquecer a geratriz da peça, enquanto o aquecimento do guia da ferramenta considera o aquecimento da largura total da tira e do passo total do componente. Além disso, como pode ser observada na Figura 18, para o método de aquecimento de Takuda, a matriz não entra em contato total com a área da geratriz do componente.

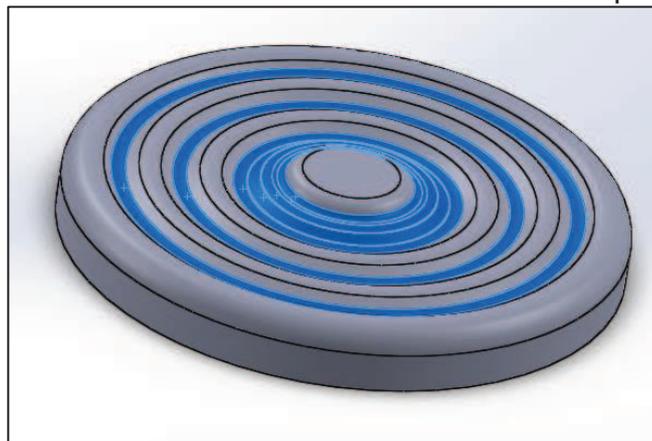
Figura 18 – Montagem entre matriz, componente e punção



Fonte: Autor (2013)

Portanto a área considerada para o cálculo da transferência de calor condutiva para este método está representada em azul na Figura 19.

Figura 19 – Área de contato entre matriz e componente



Fonte: Autor (2013)

Para ambas as áreas foi considerado contato de 20% do material com a superfície de aquecimento. Isto se deve as imperfeições do material do componente

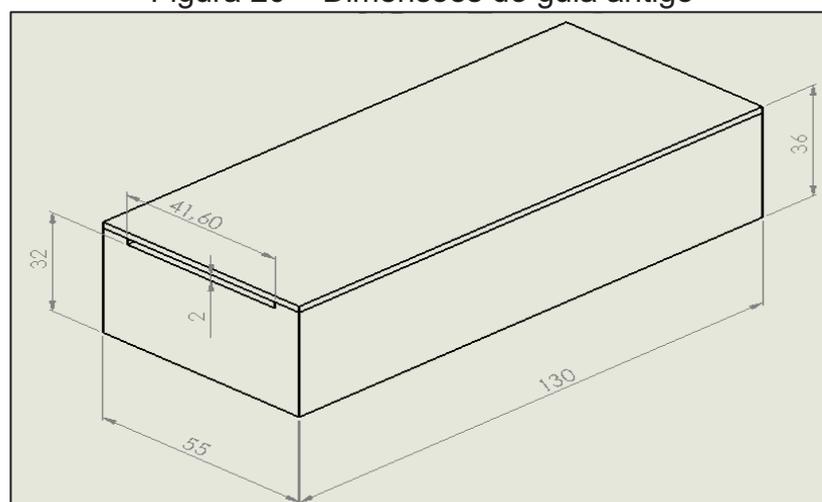
e dos materiais do guia e do punção da ferramenta. Esta estimativa foi realizada através de análise de contato entre a chapa e as superfícies que realizariam o aquecimento do material. O método que foi utilizado seguiu o modelo de análise de fechamento de moldes.

Através dos resultados encontrados com os cálculos das transferências de calor apresentados acima e da análise qualitativa de cada uma das alternativas, foi decidido que a alternativa mais vantajosa para o protótipo é o aquecimento através do guia de alimentação do material. Esta alternativa apresenta uma eficiência de transferência de calor maior do que a alternativa de aquecimento da matriz. Além disso, o aquecimento feito através do guia é mais homogêneo do que o aquecimento da matriz. Mais uma vantagem verificada no método de aquecimento através do guia da ferramenta foi o tempo de contato entre o material e o elemento de aquecimento da tira. Para o método de aquecimento através do guia o tempo pode ser ajustável de acordo com o comprimento do guia da ferramenta. Outro fator para a escolha deste método foi a facilidade de isolar a área de aquecimento do guia ao restante da ferramenta. A desvantagem desta alternativa é a distância entre o final do guia e o local de estampagem da peça, assim ocorrerá uma maior dissipação de calor em relação ao aquecimento do punção.

3.2.2. Desenvolvimento do aquecimento através do guia da tira

Definiu-se o método de aquecimento do material através do guia de entrada da tira na ferramenta, que foi re-projetado eliminando-se o guia antigo (Figura 20).

Figura 20 – Dimensões do guia antigo

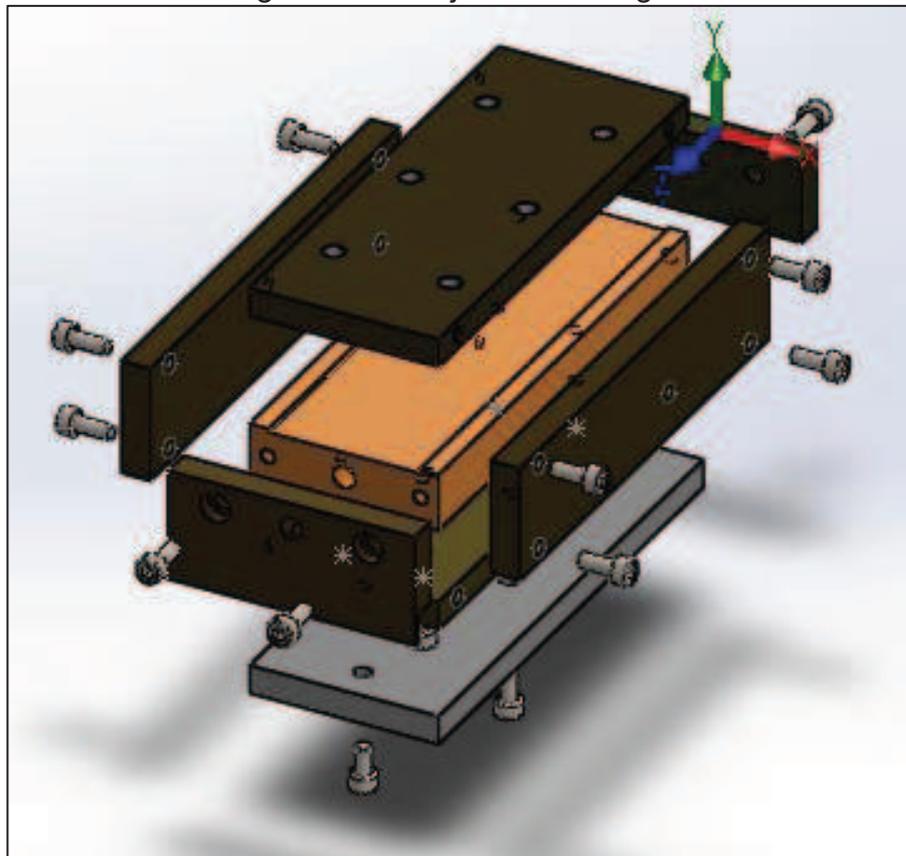


Fonte: Autor (2013)

Para manter um bom funcionamento da alimentação do material na ferramenta, as dimensões de 130 mm, 32 mm e 41,60 mm foram conservados no novo guia.

O projeto do novo guia (ANEXO D) teve por objetivo homogeneizar a temperatura, por isso foi escolhido o cobre como material base para a fabricação do guia devido a sua alta condutividade térmica. A fim de isolar a dissipação do calor e evitar que o operador possa sofrer alguma queimadura no manuseio da ferramenta, o guia de cobre foi revestido em suas cinco faces com Ambatex na espessura de 8 mm. A tampa do guia também foi feita de Ambatex. A mesma possui seis furos para que sejam colocados parafusos posicionadores que efetuam uma pressão sobre a chapa em direção à base do guia, com o intuito de melhorar o contato da tira com cobre. Uma chapa de aço 1020 na espessura de 8 mm foi acoplada na face inferior do guia, abaixo do Ambatex. No centro da peça de cobre foi feito um furo com diâmetro de 6 mm para ser acoplada uma resistência tipo cartucho, conforme pode ser visualizado na vista explodida da Figura 21.

Figura 21 – Projeto do novo guia



Fonte: Autor (2013)

O cálculo para encontrar o valor da potência da resistência foi efetuado através da Equação 5.

$$P = \frac{M \cdot c \cdot (T_2 - T_1)}{860 \cdot t} \quad (5)$$

Fonte: Casaferreira (2005).

Onde:

P = Potência [kW];

M = Massa do material [kg];

c = Calor específico do material [kcal/kg*°C];

T_1 = Temperatura final [°C];

T_2 = Temperatura inicial [°C];

t = Tempo desejado para o aquecimento [H].

Na Tabela 6 encontram-se os dados utilizados durante o cálculo da potência da resistência e o resultado da Equação 5.

Tabela 6 – Cálculo da resistência

Dados	Valores
m (kg)	0,87
c (kcal/kg*°C)	0,09
T1 (°C)	0
T2 (°C)	200
h (h)	0,13
P (W)	136,57
P (W) corrigida em 30%	177,54

Fonte: Autor (2013)

Para o cálculo da resistência foi considerado que a temperatura inicial do guia seria de 0°C e a temperatura máxima que o guia deveria atingir seria 200°C. O tempo de aquecimento foi baseado na metade do tempo estimado pela empresa para o *setup* de uma ferramenta de estampo (8 minutos). Conforme recomendação do fornecedor da resistência deve-se somar 30% de potência ao valor encontrado pela equação. Portanto para o aquecimento do guia foi selecionada uma resistência com potência de 180 W, do tipo cartucho, com termopar embutido para controle da temperatura.

3.2.3. Teste do aquecimento da tira

Após o projeto do guia e a definição da potência da resistência foi realizada a usinagem dos componentes do guia e a montagem do novo guia na ferramenta que estampa o diafragma conforme Figura 22.

Figura 22 – Montagem do novo guia na ferramenta



Fonte: Autor (2013)

Sabendo-se que a temperatura crítica para o rompimento do diafragma é de 10°C, o teste procurou simular temperaturas inferiores à temperatura crítica a fim de verificar se o aquecimento da tira através do guia seria eficaz. Tomando em consideração o histórico climático de Caxias do Sul, foi definido que o aquecimento da tira deveria partir de 0°C até atingir as temperaturas de 50°C e 80°C no ponto onde ocorre o contato entre a chapa, o punção e a matriz da ferramenta.

A temperatura ambiente durante a realização do teste era de 15°C, portanto acima da temperatura crítica do processo. Para ser atingida a temperatura de 0°C no passo anterior a entrada do material no guia da ferramenta, a tira foi resfriada em um tanque com álcool e gelo à temperatura de -9°C, conforme pode ser observado na Figura 23. Para a medição das temperaturas foi utilizado um termômetro digital a *laser* marca Instrutherm modelo TI-860.

Figura 23 – Resfriamento da tira



Fonte: Autor (2013)

A resistência foi conectada a um controlador de temperatura, cuja função é controlar a temperatura de aquecimento da resistência. Para isso o mesmo energiza a resistência assim fazendo com que a mesma aqueça. Em seu *display* o usuário define qual a temperatura de operação desejada para a resistência. A tomada de temperatura é feita através de um termopar, neste caso, embutida no corpo da resistência. Enquanto a temperatura da resistência for inferior a temperatura determinada pelo usuário, o controlador continua fornecendo energia à resistência. Assim que a temperatura ultrapassar a temperatura de operação definida o controlador interrompe o fornecimento de energia à resistência, até sua temperatura ser inferior à temperatura definida, desta forma iniciando o ciclo de aquecimento novamente.

O primeiro teste realizado visou aquecer a chapa de uma temperatura inicial de 0°C até 50°C no ponto onde ocorre o contato entre o punção a matriz e a chapa. Conforme pode ser observado na Figura 24 foi necessário elevar a temperatura da resistência até 110°C. Foram estampadas 200 amostras com a esta temperatura.

Figura 24 – Teste 50°C



Fonte: Autor (2013)

O segundo teste foi realizado na sequência do teste a 50°C, e tinha por objetivo elevar a temperatura da tira de 0°C até 80°C no ponto de estampagem da chapa. Para que se conseguisse atingir a temperatura desejada, foi necessário aquecer a resistência à 170°C, conforme Figura 25. Também foram retiradas 200 peças de amostra nesta faixa de temperatura.

Figura 25 – Teste 80°C



Fonte: Autor (2013)

As amostras retiradas em ambas as faixas de temperatura foram utilizadas para serem efetuados testes de vida do conjunto do diafragma e para o estudo Dimensional do componente. Não foi encontrada nenhuma peça fraturada durante os testes da ferramenta.

3.2.4. Teste de vida do conjunto diafragma

Com o intuito de verificar se o aquecimento do material poderia fragilizar o componente foi realizado teste de vida nas peças estampadas. O procedimento do teste de vida segue um roteiro definido através de uma instrução de engenharia (IE) da empresa.

Seguindo o roteiro definido pela IE, foram selecionadas aleatoriamente seis peças estampadas em ambas faixas de temperatura. Estas peças foram montadas formando o conjunto dos diafragmas, composto pelo diafragma externo, diafragma interno, pinos de acionamento e capilar de cobre. O conjunto diafragma permaneceu sem ser selado para a realização do teste de vida. A partir desta montagem, os conjuntos do diafragma foram levados até o laboratório de testes da empresa, onde está localizado o dispositivo responsável por efetuar o teste de vida (Figura 26).

Figura 26 – Dispositivo do teste de vida do conjunto diafragma



Fonte: Autor (2013).

Os diafragmas foram acoplados nos berços de alumínio. Após a acoplagem foi adicionado água nos berços até os diafragmas ficarem completamente submersos. A função da água é auxiliar a visualização de algum possível microvazamento no conjunto dos diafragmas. O dispositivo necessita ser calibrado em seu ponto zero para realizar o teste. Esta calibragem é feita através de um parafuso que atua como batente para conjunto diafragma e de um bloco padrão com determinada espessura. O bloco padrão é colocado entre o pino que transmite a carga aos diafragmas e o parafuso, assim deixando um espaçamento entre ambos. Após esta calibragem do ponto zero do dispositivo foi acoplada a ponta do capilar aos engates rápidos de ar. Assim ar comprimido exerce a pressão interna no conjunto diafragma fazendo o mesmo dilatar até atingir o parafuso regulado anteriormente, simulando o acionamento do mesmo. Após o acionamento do conjunto é retirada a pressão do ar comprimido do interior do conjunto dos diafragmas e através das cargas o diafragma retorna ao ponto zero, assim finalizando um ciclo. Os conjuntos testados devem suportar 50000 ciclos sem sofrerem fratura, vazamento ou deformações para serem aprovados no teste.

3.2.5. Análise dimensional do diafragma

Foi realizada análise dimensional nas peças estampadas com o aquecimento da tira. Este estudo foi realizado com o objetivo de verificar qual a influência que o aquecimento da chapa exerce sobre os valores dimensionais do componente estampado e determinar qual a faixa de temperatura foi a que apresentou melhores resultados.

Aleatoriamente foram separadas cinquenta peças dentre as duzentas estampadas em cada faixa de temperatura durante os testes de aquecimento. Também foram estampadas cinquenta peças em temperatura ambiente (15°C), com o intuito de comparar as peças estampadas a temperatura ambiente e as peças estampadas com o aquecimento da chapa. As amostras foram produzidas sem que fosse alterada os parâmetros de pressão da máquina para as três temperaturas. Apenas houve variação da temperatura de estampagem durante a produção das amostras. Todas as amostras foram dimensionadas conforme a instrução de qualidade da empresa.

A dimensão $31,69 \pm 0,02$ mm foi medida com um paquímetro digital Mitutoyo modelo *absolute*. Foi tomada a medida máxima e medida mínima do diâmetro, para ser verificada qual a magnitude da ovalização presente no componente. As dimensões de $0,64 \pm 0,05$ e $0,79 \pm 0,05$ foram tomadas através de um relógio comparador digital Mahr modelo Millitast 1083.

3.2.6. Ensaio de tração

Foi realizado ensaio de tração no material utilizado para a confecção das amostras estampadas a morno. Este ensaio teve o objetivo de verificar se os requisitos mecânicos expressos na especificação de material da empresa são atendidos pelo material. Os requisitos verificados foram tensão de escoamento, resistência a tração e percentual de alongamento mínimo (em 50mm).

O ensaio seguiu a normatização ABNT NBR ISO 6892. Assim foram ensaiados quatro corpos de prova na direção de laminação de 0° . Os ensaios no sentido de laminação de 90° e 45° não puderam ser realizados devido a tira não possuir largura suficiente para a confecção dos corpos de prova. Conforme especificação da empresa materiais com largura inferior a 228,6 mm, somente

necessitam ser ensaiados a 90°, portanto o ensaio atendeu a especificação da empresa.

Os dados obtidos no ensaio também foram utilizados para que fosse encontrada a curva de Hollomon do material. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul (Figura 27). Os corpos de prova foram fornecidos pela empresa.

Figura 27 – Ensaio de tração



Fonte: Autor (2013)

3.2.7. Ensaio de dureza

Foi realizado ensaio de dureza (Figura 28) no material utilizado para a estampagem do diafragma. O ensaio foi realizado com objetivo de verificar se o material está de acordo com a especificação da empresa. O ensaio foi realizado no laboratório de testes da empresa. Foi utilizado um durômetro Rockwell fabricante Wilson.

Figura 28 – Ensaio de dureza



Fonte: Autor (2013)

3.2.8. Teste da composição química do componente

Foi realizado teste para verificação da composição química do componente através de um ensaio de raios-x. O objetivo teste foi verificar se a composição química do material utilizado para os testes de estampagem com aquecimento da chapa estava de acordo com o especificado pela empresa.

O funcionamento básico do teste consiste em emissão de raios-x em uma superfície plana do componente. O raio-x bombardeia os elétrons do componente fazendo com que os mesmos troquem de camada de valência. A troca de camada faz com que energia em forma de onda seja dissipada. Cada elemento presente no material emite uma onda com comprimento diferente. Os sensores do equipamento são previamente calibrados e captam cada onda emitida e através de um software calcula qual a porcentagem de cada elemento está presente no material.

O ensaio foi realizado no laboratório de testes da empresa utilizou um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva Shimadzu modelo EDX-720 (Figura 29).

Figura 29 – Espectrômetro de raios-x Shimadzu modelo EDX-720



Fonte: Autor (2013)

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADO DO TESTE DE VIDA DO COMPONENTE

As amostras submetidas ao teste de vida realizado na empresa foram cicladas até o momento da falha do conjunto. As amostras estampadas a temperatura à 50°C falharam com aproximadamente com 65.000 ciclos. As amostras estampadas em temperatura próxima à 80°C falharam com aproximadamente 63.000 ciclos. Portanto as peças foram aprovadas no teste de vida do componente.

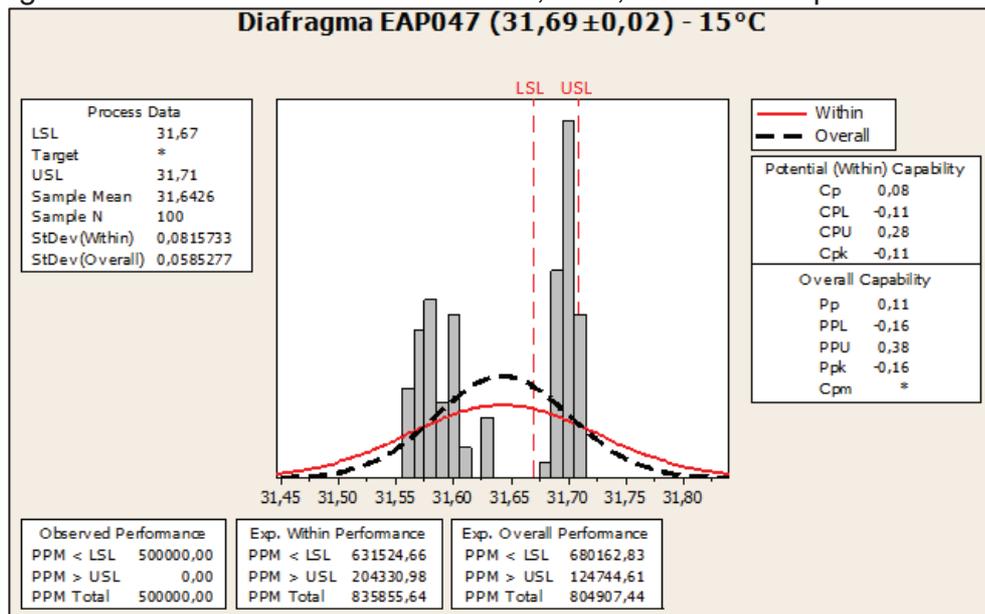
4.2. RESULTADO DO ESTUDO DE DIMENSIONAL DO COMPONENTE

A partir dos valores dimensionais encontrados nas amostras separadas durante os testes de aquecimento do guia da ferramenta, foram gerados gráficos estatísticos comparando o processo proposto ao processo anterior em cada dimensional crítico do componente. Os gráficos foram construídos com o auxílio do *software* estatístico Minitab. As amostras que tiveram suas dimensões analisadas foram estampadas em três temperaturas diferentes. A primeira temperatura foi a temperatura ambiente (15°C) no momento que foram realizados os testes do protótipo instalado na ferramenta. A segunda e a terceira temperatura de estampagem foram 50°C e 80°C respectivamente. As peças estampadas a temperatura ambiente serviram de parâmetro de comparação entre o processo anterior e o processo testado.

4.2.1. Análise dimensional do diâmetro de $31,69 \pm 0,02$ mm

O gráfico apresentado na Figura 30 mostra o comportamento dos valores dimensionais do componente estampado a temperatura ambiente (aproximadamente 15°C). O gráfico apresenta os valores dimensionais onde o diâmetro apresenta o valor máximo e o valor mínimo para a verificação da ovalização da peça.

Figura 30 – Gráfico do diâmetro de $31,69 \pm 0,02$ mm à temperatura 15°C

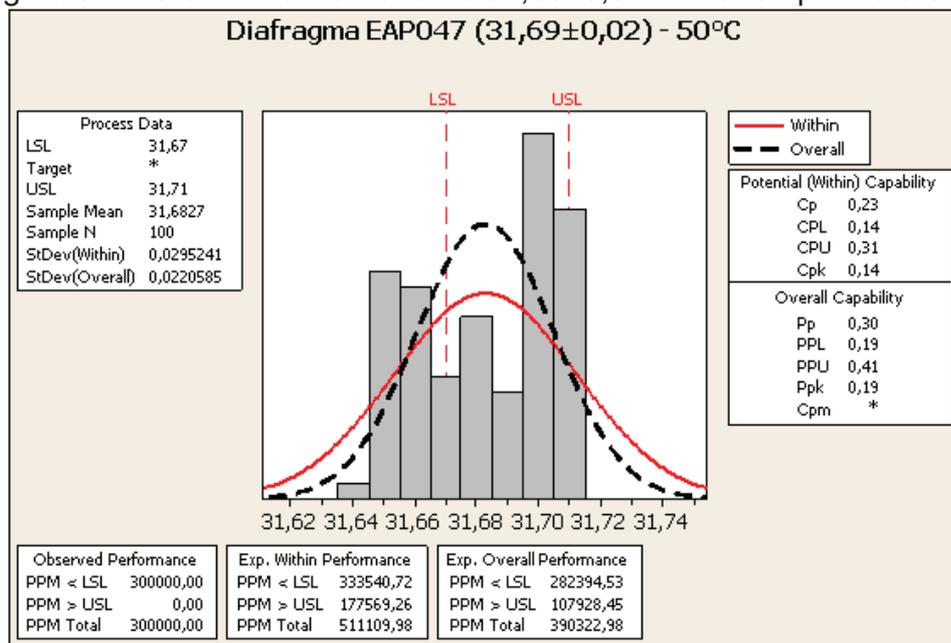


Fonte: Autor (2013).

Como pode ser observado na Figura 30 o processo a temperatura ambiente (15°C) apresenta dimensões fora do especificado em desenho e vem sendo utilizado através de desvio de engenharia. Também pode ser visualizado que a ovalização do componente é de aproximadamente 0,16 mm.

A Figura 31 apresenta o gráfico gerado a partir das amostras estampadas a aproximadamente 50°C .

Figura 31 – Gráfico do diâmetro de $31,69 \pm 0,02$ mm à temperatura 50°C

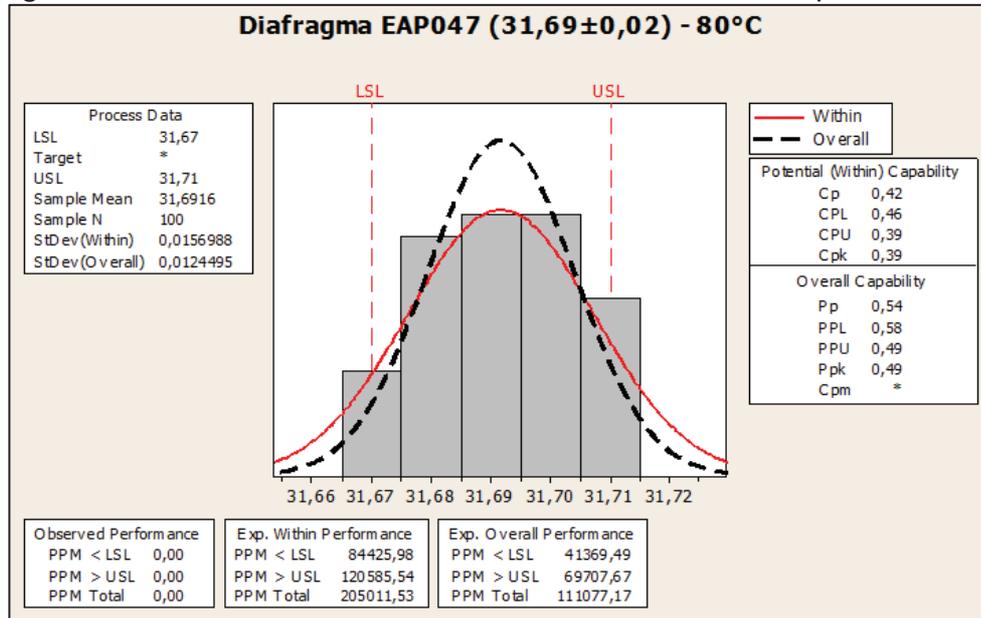


Fonte: Autor (2013).

O gráfico que pode ser visualizado na Figura 31 demonstra que o componente permaneceu com alguns valores dimensionais fora da especificação dimensional do componente. Porém apresenta valores mais próximos ao limite da tolerância do que os encontrados na estampagem a temperatura ambiente. A ovalização encontrada também reduziu a aproximadamente 0,08 mm.

A Figura 32 apresenta o gráfico das peças estampadas à aproximadamente 80°C.

Figura 32 – Gráfico do diâmetro de $31,69 \pm 0,02$ mm à temperatura 80°C

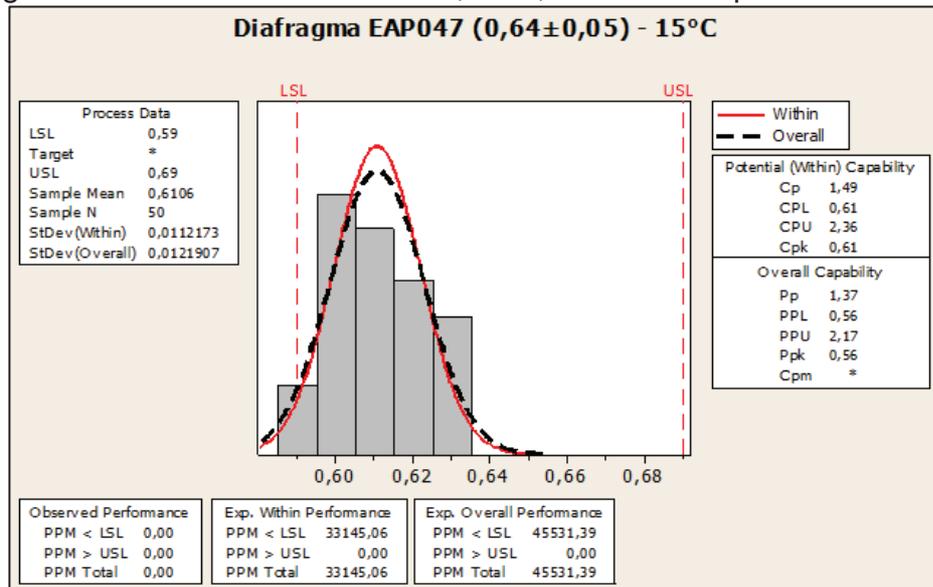


Fonte: Autor (2013).

Analisando o gráfico pode ser visualizado que todas as amostras apresentaram valores dimensionais dentro do especificado pelo desenho do produto. As amostras apresentaram uma maior repetibilidade dos valores dimensionais se comparada as amostras produzidas nas outras temperaturas. A ovalização também reduziu a um valor de aproximadamente 0,04mm.

4.2.2. Análise dimensional da altura de $0,64 \pm 0,05$ mm

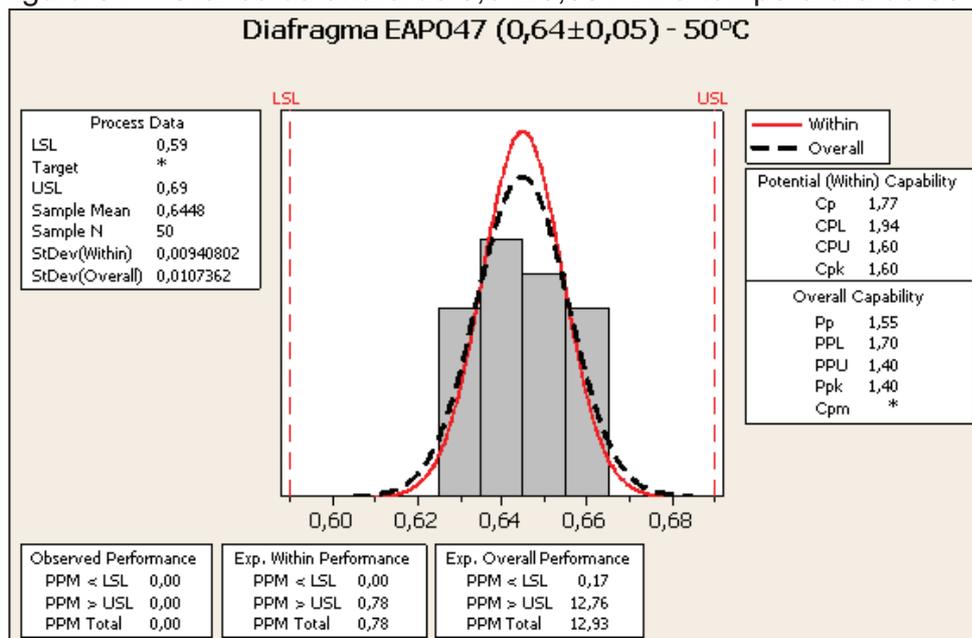
A Figura 30 apresenta o gráfico gerado a partir da altura de $0,64 \pm 0,05$ mm das amostras estampadas a temperatura ambiente.

Figura 33 – Gráfico da altura de $0,64 \pm 0,05$ mm à temperatura de 15°C 

Fonte: Autor (2013).

Interpretando-se o gráfico pode se verificar que as amostras apresentaram valores dimensionais dentro do especificado em desenho. Porém os valores encontrados tenderam ao limite inferior da tolerância desta dimensão.

A Figura 34 apresenta o gráfico gerado a partir do dimensional de $0,64 \pm 0,05$ mm estampado à temperatura aproximadamente de 50°C .

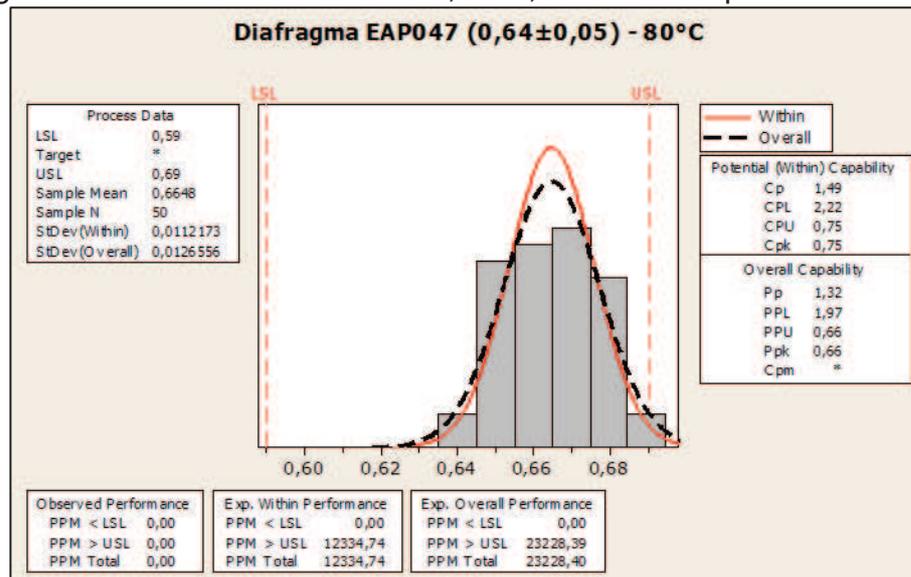
Figura 34 – Gráfico da altura de $0,64 \pm 0,05$ mm à temperatura de 50°C 

Fonte: Autor (2013).

O gráfico que pode ser visualizado na Figura 34 demonstra que os valores dimensionais encontrados nas amostras produzidas a aproximadamente 50°C estão centralizados próximos a dimensão nominal da peça. Também não existe grande variação nos dimensionais encontrados nestas peças.

O gráfico gerado para a estampagem em temperaturas próximas a 80°C é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Gráfico da altura de $0,64 \pm 0,05$ mm à temperatura de 50°C



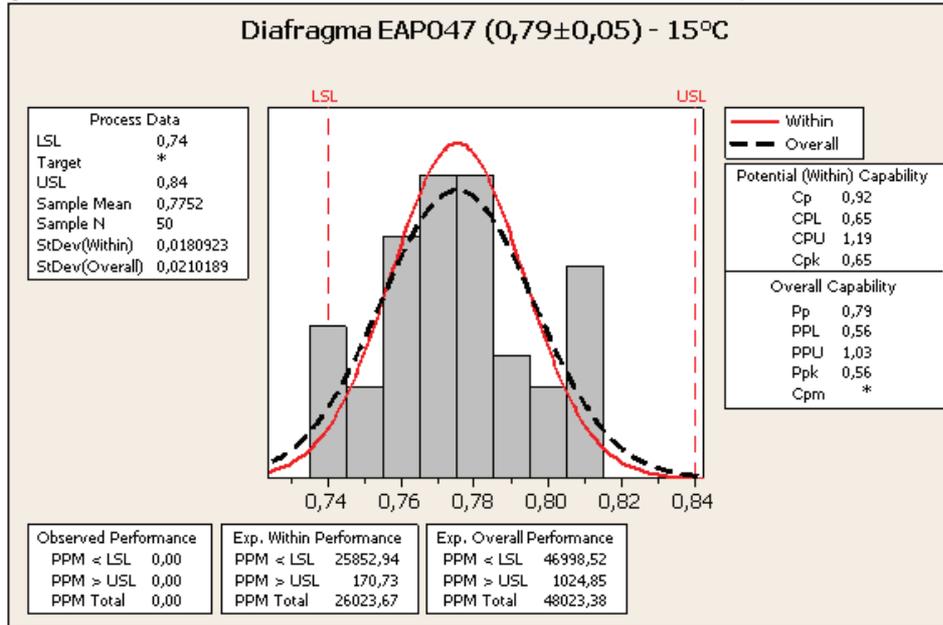
Fonte: Autor (2013).

Analisando o gráfico pode-se verificar que os valores dimensionais encontrados nas amostras estampadas a aproximadamente 80°C estão dentro do especificado em desenho. Os valores dimensionais estão tendendo ao limite superior da tolerância do componente. As amostras produzidas à 80°C apresentaram uma variação maior do que as peças estampadas a 15°C e 50°C..

4.2.3. Análise dimensional da altura de $0,79 \pm 0,05$ mm

O gráfico apresentado na Figura 36 mostra os valores dimensionais referentes a cota de $0,79 \pm 0,05$ para as amostras estampadas a temperatura ambiente.

Figura 36 – Gráfico da altura de $0,79 \pm 0,05$ mm à temperatura de 15°C

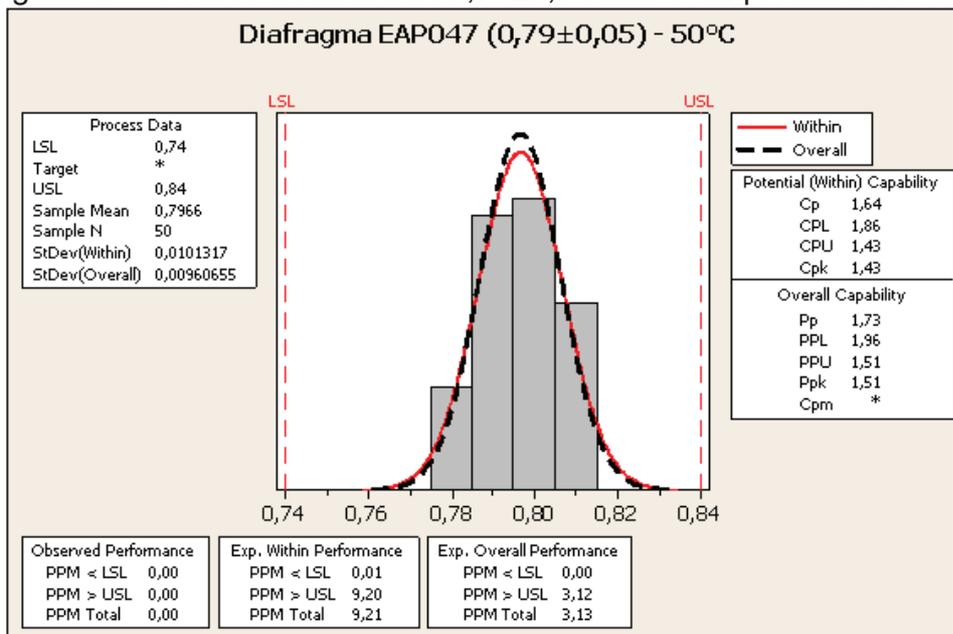


Fonte: Autor (2013).

No gráfico pode ser observado que os valores dimensionais tomados destas amostras estão conforme especificado em desenho. Porém existe uma grande variação dos valores dentro da faixa da tolerância.

A Figura 37 apresenta o gráfico gerado a partir das amostras estampadas na faixa de temperatura de 50°C .

Figura 37 – Gráfico da altura de $0,79 \pm 0,05$ mm à temperatura de 50°C

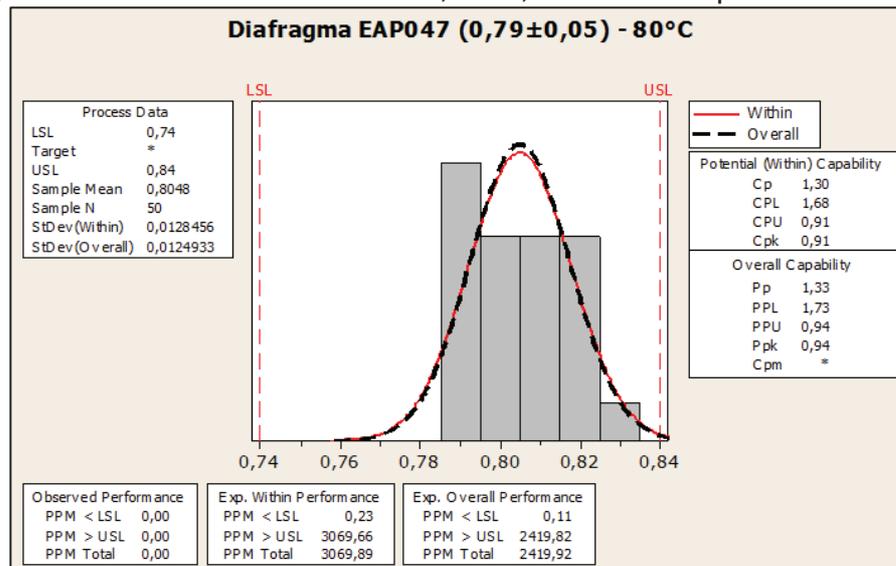


Fonte: Autor (2013).

Analisando o gráfico, pode ser verificado que os valores dimensionais tomados destas amostras estão dentro do especificado em desenho. Além disso, a variação dimensional que se tinha nas peças estampadas à temperatura ambiente reduziu consideravelmente.

O último gráfico gerado (Figura 38) da análise do dimensional de $0,79 \pm 0,05$ utilizou as amostras estampadas na faixa de temperatura próxima a 80°C .

Figura 38 – Gráfico da altura de $0,79 \pm 0,05$ mm à temperatura de 80°C



Fonte: Autor (2013).

Analisando o gráfico pode-se verificar que as dimensões do componente se mantiveram dentro do especificado em desenho, e tenderam à tolerância superior do componente. A variação dimensional foi um pouco maior do que nas peças estampadas a 50°C , porém ainda apresentou um resultado melhor do que as peças estampadas a temperatura ambiente.

As amostras estampadas na temperatura de 80°C foram as que apresentaram os melhores resultados dimensionais para o componente. Apesar de algumas peças estarem no limite superior da tolerância dimensional do componente, esta temperatura foi a única que não apresentou nenhum dos valores dimensionais medidos fora do especificado em desenho. Portanto se tornou a temperatura (dentre as testadas) mais adequada para o processo.

4.3. RESULTADO ENSAIO DE TRAÇÃO

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de tração (ANEXO A) referentes a tensão de escoamento, resistência a tração e percentual de alongamento mínimo (em 50mm). O corpo de prova 4 apresentou escorregamento do extensômetro, portanto não foi considerado nos resultados.

Tabela 7 – Resultados ensaio de tração

Corpo de prova	Espessura (mm)	Largura (mm)	Tensão de escoamento (MPa)	Resistência a tração (MPa)	Comprimento inicial (mm)	Comprimento final (mm)	Percentual de alongamento (%)
CP 1	0,19	19,97	957,3	1325,3	50	61,1	22,2
CP 2	0,2	19,99	887,1	1224,8	50	60,2	20,4
CP 3	0,23	20,01	788,7	1089,8	50	63,9	27,8

Fonte: Autor (2013)

Comparando os resultados encontrados no ensaio de tração com os requisitos solicitados através da especificação de material da empresa (Tabela 3), pode-se verificar que o material está de acordo com a especificação.

As diferenças entre os valores encontradas para cada corpo de prova são decorrentes das diferenças entre as espessuras e larguras do material. Outro fator que influenciou na obtenção da curva foi o fato de que apenas o corpo de prova 3 rompeu dentro da área abrangida pelo extensômetro. O corpo de prova 1 rompeu acima do extensômetro e o corpo de prova 2 rompeu abaixo do extensômetro.

A partir da obtenção da curva tensão-deformação do material foram utilizados os valores da Tabela 8 para encontrar a equação da curva de Hollomon do material (Equação 4). Lembrando que o ensaio foi realizado somente no sentido de laminação de 0°C, portanto a curva foi obtida apenas neste sentido da tira.

Tabela 8 – Resultados da obtenção da curva de Hollomon

Corpo de prova	Sentido de laminação	K_f
1	0°	$K_F = 1908,3 * \varphi^{0,1333}$
2	0°	$K_F = 1773 * \varphi^{0,1373}$
3	0°	$K_F = 1538,3 * \varphi^{0,1331}$
Média KF		$K_F = 1739,87 * \varphi^{0,1346}$

Fonte: Autor (2013)

As equações obtidas para cada corpo de prova foram encontradas através do *software* Microsoft Excel. Foram construídos gráficos de dispersão com os resultados obtidos pelo ensaio de tração em cada corpo de prova. A partir da construção dos gráficos foi adicionado uma linha de tendência do tipo potência, assim obtendo-se as equações.

4.4. RESULTADO DO ENSAIO DE DUREZA

Foram ensaiadas 5 amostras do material que é utilizado na fabricação do diafragma. Devido ao material não ser tratado térmicamente, o mesmo foi ensaiado através do método Rockwell superficial. Foi utilizada uma ponteira esférica de 1/16" e a carga principal utilizada no ensaio foi de 30 kgf, caracterizando o ensaio 30T.

O resultado encontrado foi uma dureza de 85,5 30T. Utilizando a tabela de conversão (ANEXO B) foi convertido o resultado da dureza 30T para HRC (*Hardness* Rockwell C), obtendo o resultado de 30 HRC. Portanto o material encontra-se de acordo com a especificação da empresa.

4.5. RESULTADO DO TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 9 apresenta os resultados do teste de composição química do material (ANEXO C) utilizado para a fabricação das amostras do componente estampado a frio.

Tabela 9 – Resultados teste de composição química

Elemento	Valor percentual encontrado
Fe	71,063%
Cr	17,899%
Ni	8,801%
Mn	1,439%
Cu	0,456%
Mo	0,275%
V	0,066%

Fonte: Autor (2013)

Comparando os elementos encontrados através do teste com o definido na especificação de material (Tabela 4) pode-se verificar que foi detectado vanádio, cobre e molibdênio que não estão presentes na especificação. O percentual níquel

também está acima do determinado na especificação do material. Os elementos cromo e manganês estão de acordo com a especificação.

O maior percentual de níquel no material inibe a formação da martensita induzida durante a estampagem, porém o material não está de acordo com a especificação da empresa.

5. CONCLUSÃO

Com o objetivo de solucionar a ruptura do componente durante o processo de estampagem, investigou-se a literatura referente a conformação dos aços inoxidáveis austeníticos. Desta forma foi possível entender o comportamento destes aços submetidos a tensões decorrentes do processo de estampagem bem como a influência da temperatura durante o processo de conformação.

O protótipo desenvolvido para efetuar o aquecimento da tira atendeu ao escopo inicial do projeto, efetuando um aquecimento uniforme da chapa. As temperaturas selecionadas para os testes de aquecimento da tira apresentaram um resultado dimensional melhor em relação as peças estampadas a temperatura ambiente.

Também através da análise dimensional foi possível verificar que as amostras estampadas a temperatura de 80°C mantiveram-se dentro do especificado em desenho. Desta forma foi definido que o processo de estampagem a morno deve ser a 80°C. Além disso, as amostras estampadas através do aquecimento da tira foram aprovadas no teste de vida útil do componente.

Analisando os resultados obtidos através dos ensaios de tração e dureza, foi possível verificar que o material atende os requisitos mecânicos expressos na especificação do material da empresa. Em relação a composição química foi possível detectar um leve desvio em relação aos requisitos químicos presentes na especificação de material a empresa. Este desvio foi encontrado no ensaio de raio-x.

Em geral o teste de estampagem a morno apresentou um bom resultado comparado as peças estampadas sem o aquecimento da tira. Nenhuma das peças estampadas à morno apresentou fratura durante os testes. Portanto a estampagem a morno solucionou o problema de ruptura do componente (diafragma) minimizando a influência da transformação martensítica induzida por temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ELINOX. **Catálogo Elinox**. São Paulo, SP: [s.n.], [entre 2010 e 2013]. Disponível em: <<http://www.elinox.com.br/aco-inox/tipos-de-aplicacoes>>. Acesso em: 22 mar. 2013, 14:35:22.
- SIDERAÇOS FITAS. **Aços Inox**. São Paulo, SP: [s.n.], [entre 2012 e 2013]. Disponível em: <http://www.sideracofitas.com.br/centrotecnico/ACOS_INOX.pdf>. Acesso em 22 mar. 2013, 15:00:35.
- PELLISSARI, Luciano A.; MOREIRA, Rodolfo J. **Aços Resistentes ao Desgaste e à Corrosão**. Mogi Mirim, SP: [s.n.], [2010]. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABESUAB/trabalho-desgaste>>. Acesso em: 22 mar. 2013, 15:15:47.
- MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares; RUGANI, Léo Lucas. **Manual Aço Inox Estampagem Acesita**. Timóteo, MG: [s.n.], 1997. 41 p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABH0AAH/aco-inox-manual-estampagem>>. Acesso em: 22 mar. 2013, 15:30:12.
- SANTOS, Marta Ribeiro. **Efeito do Nitrogênio e do Cobre na Formação da Martensita em Aços Inoxidáveis Austeníticos e sua Influência sobre o Fenômeno de Delayed Cracking**. 2008. 239 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2008.
- CALLISTER Jr, William D. **Ciência de Engenharia de Materiais uma Introdução**. 5 ed. Vila Mariana: LTC, 2002. 589 p.
- STEELSUL. **Catálogo de produtos aço Inox**. São Paulo, SP: [s.n.], [entre 2010 e 2013]. Disponível em <http://www.steelsul.com.br/Catalogo_tecnico_aco_inox.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2013, 10:41:33.
- GALLÉE, S.; MANACH, P. Y.; THUILLIER, S. Mechanical behaviors of a metastable austenitic stainless steel under simple and complex loading paths. **Materials Science and Engineering A**, p. 47-55, 2007.
- DAS, A. et al. Analysis of deformation induced martensitic transformation in stainless steel. **Materials Science and Technology**, p. 366-370, 2011.
- HUANG, Junxia. et al. Enhanced mechanical properties of type AISI301LN austenitic stainless steel through advanced thermo mechanical process. **Materials Science and Engineering A**, p. 190 – 195, 2012.
- DAS, Arpan; TARAFDER, Soumitra; CHAKRABORTI, Pravash C. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels. **Materials Science and Engineering A**, p. 9-20, 2011.
- RAJ, A. K.; KUMAR, J. S.; PADMANABHAN, K. A. Martensitic transformation and plastic flow in metastable 2.5 wt. % nickel austenitic stainless steel sheets. **Materials Letters**, p. 386-390, 1999.
- CETEC, **Ciência dos materiais multimídia**, Belo Horizonte, MG: [s.n.], [entre 2010 e 2013]. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=10&top=22>>. Acesso em: 13 abr. 2013, 17:22:41.
- CIMM, **Empacotamento Atômico dos Cristais – Introdução**, Florianópolis, SC: [s.n.], [2012]. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6414-empacotamento-atomico-dos-cristais-introducao#.UWI1cbXvuVU>. Acesso em: 14 abr. 2013, 09:15:11.

KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure, and Performance**, Ohio: ASM International, 2005. 613 p.

PADILHA, A.F.; RIOS, P.R., Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels. **ISIJ international**, p. 325 – 337, 2002.

MOREIRA, Marcelo F.; LEBRÃO, Susana M. G. **Aços Inoxidáveis**. [S.l.]: [s.n.], [entre 2010 e 2013]. Disponível em: < <http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/inoxidaveis.pdf> >. Acesso em: 14 abr. 2013, 11:09:35.

ESTAMPAGEM. Manaus, AM: [s.n.], [entre 2007 e 2008]. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAPTcAH/estampagem>>. Acesso em 14 abr. 2013, 13:22:52.

RADAELLI, Ronaldo. **Estudo do comportamento do aço inoxidável AISI 304 em estampagem profunda a morno**. 2012. 37 f. Dissertação (Relatório de estágio 1 de Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Curso de graduação em Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, 2012.

WARM forming of stainless steels – Part I. [S.l.]: [s.n.], 2006. Disponível em: < <http://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/warm-forming-of-stainless-steels---part-i>>. Acesso em 14 abr. 2013, 13:44:42.

MORI, K.; MAKI, S.; TANAKA, Y. **Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating**. Toyohashi, Japão: Toyohashi University of Technology, [entre 2010 e 2013]. 4 p.

TAKUDA, H. et al. Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, p.242-248, 2003.

BHADESHIA, H.K.D.H. Steels for bearings. **Progress in Materials Science**, p.268-435, 2012.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004

TSCHAETSCH, H. **Metal Forming Practise**. 1 ed. Dresden: Springer, 2005. 405 p.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S.; DEWITT, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2011. 1076 p.

JORGE Jr, A. M. **Análise de comportamento mecânico de aços inoxidáveis em altas temperaturas e altas taxas de deformação**. 1997. 200 f. (Tese de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, 1997.

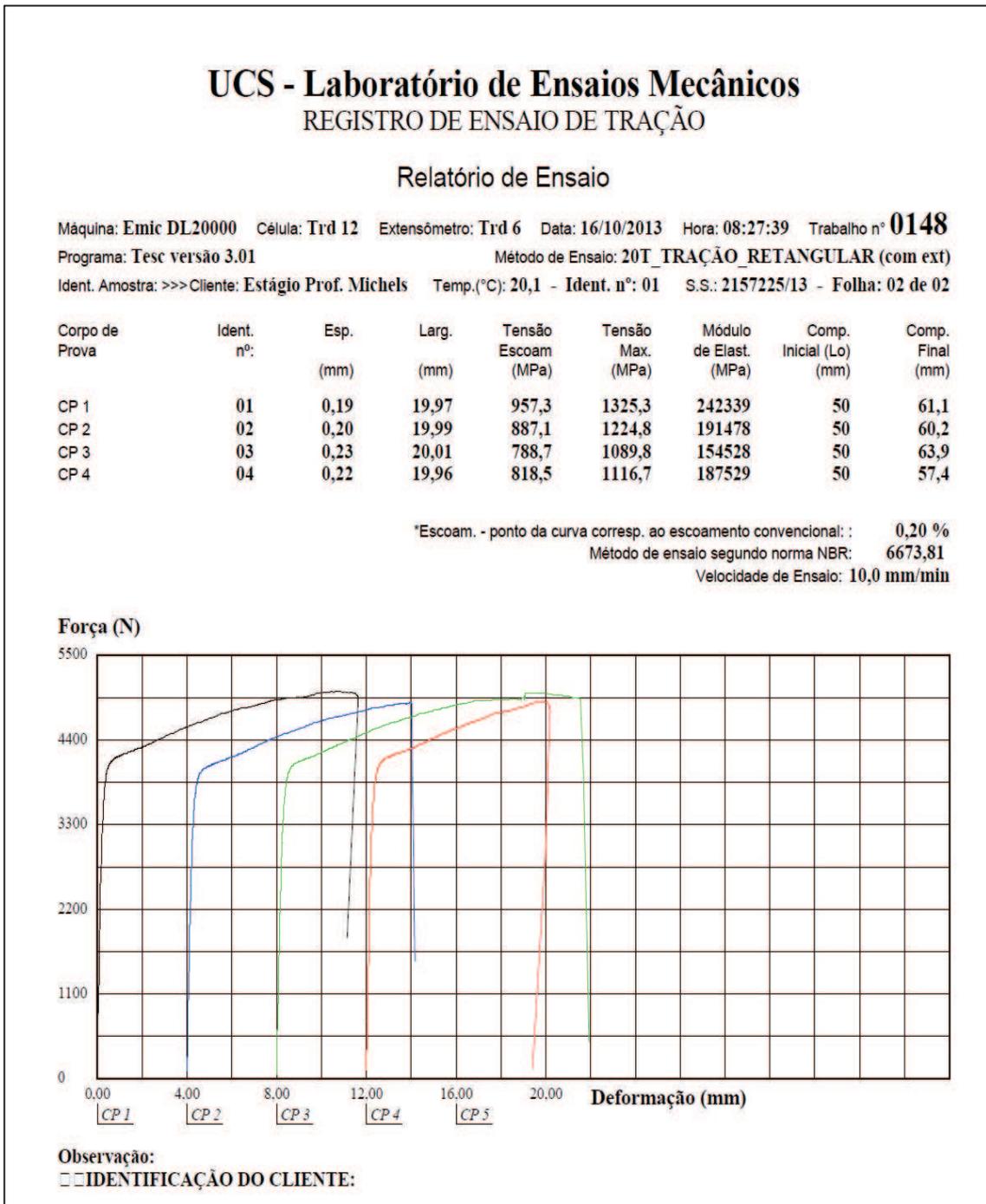
MORAIS, W. A. Santos, SP [s.n.], [entre 2000 e 2010]. Disponível em: < http://www.quimica.ufpr.br/nunesgg/CQ027/CQ027_trabalho/Fluorec%EAncia%20de%20Raios%20-%20X.pdf>. Acesso em 25 out. 2013, 13:40:12.

CASA Ferreira São Paulo, SP: [s.n.], [2013]. Disponível em: < <http://www.casaferreira.com.br/>>. Acesso em 10 out. 2013, 19:27:13.

AÇOSVIC São Paulo, SP: [s.n.], [2013]. Disponível em: <http://acosvic.com.br/tabelas/tabela_06.pdf>. Acesso em 27 out. 2013, 13:35:44.

ANEXO A – REGISTRO ENSAIO DE TRAÇÃO

A seguir pode ser observado o resultado do ensaio de tração.



ANEXO B – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA

CONVERSÃO DE DUREZAS											
HRA	HRB	HRC	HRF	HRG	HRK	15T	30T	45T	HV	HB	RT
Diamante 60 Kg. preta	Esf. 100 Kg. verm.	Diamante 150 Kg. preta	Esf. 1/16" 60 Kg. verm.	Esf. 150 Kg. verm.	Esf. 1/8 150 Kg. verm.	Esf. 1/16" 15 Kg. superfi	Esf. 1/16" 30 Kg. superfi	Esf. 1/16" 45 Kg. superfi	10 Kg. direta	Esf. 25mm. 187 Kg. direta	MPA
	0		57		21		15		62	58	204,76
	1		57,5		22	61	16				
	2		58		23	61,5	16,5		63	59	208,29
	3		59		23,5		17				
	4		59,5		24,5	62	18				
	5		60		25,5	62,5	18,5		64	60	211,82
	6		60,5		26		19,5				
	7		61		27	63	20		65	61	215,35
	8		61,5		28	63,5	20,5				
	9		62		29		21,5				
	10		63		29,5	64	22		66	62	218,88
	11		63,5		30,5		23				
	12		64		31,5	64,5	23,5				
	13		64,5		32	65	24		67	63	222,41
	14		65		33		25				
20	15		65,5		34	65,5	25,5		68	64	225,94
20,5	16		66		35	66	26				
21	17		66,5		36,5		27		69	65	229,47
	18		67		37,5	66,5	27,5				
21,5	19		67,5		38	67	28,5		70	66	233
22	20		68		39		29				
22,5	21		68,5		40	67,5	29,5		71	67	236,53
23	22		69		41		30,5				

ANEXO B – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA (Continuação)

23,5	23		69,5		41,5	68	31		72	68	240,06
24	24		70		42,5	68,5	32				
	25		70,5		43,5		32,5		73	69	243,59
24,5	26		71		44,5	69	33		74	70	247,12
25	27		72		45	69,5	34				
25,5	28		72,5		46		34,5		75	71	250,65
26	29		73		47	70	35,5	1			
26,5	30		73,5		48	70,5	36	2	76	72	254,18
27	31		74		48,5		36,5	3	77	73	257,71
27,5	32		74,5		49,5	71	37,5	4			
	33		75		50,5		38	5	78	74	261,25
28	34		75,5		51,5	71,5	38,5	6	79	75	264,77
28,5	35		76,5		52	72	39,5	7	80	76	268,3
29	36		77		53		40	8			
29,5	37		77,5		54	72,5	40,5	9	81	77	271,84
30	38		78		54,5	73	41,5	10	83	78	275,37
30,5	39		78,5		55,5		42	11	84	79	278,9
	40		79		56,5	73,5	43	12,5			
31	41		79,5		57,5	74	43,5	13,5	85	80	282,43
31,5	42		80,5		58		44	14,5	86	81	285,96
32	43		81		59	74,5	45,5	15,5	87	82	289,49
32,5	44		81,5		60	75	45	16,5	88	83	293,02
33	45		82		61		45,5	17,5	89	84	296,05
33,5	46		82,5		61,5	75,5	46	18,5			
34	47		83		62,5	76	47	19,5	90	85	300,08
4,5	48		84		63,5		47,5	20,5	91	86	303,61
	49		84,5		64,5	76,5	48,5	22	92	87	307,14
35	50		85	2,5	65	77	49	23	93	88	310,66
35,5,	51		85,5	4	66		49,5	24	94	89	314,2
36	52		86	5,5	67	77,5	50,5	25	95	90	317,73
36,5	53		86,5	7	68	78	51	26			
37	54		87	8,5	68,5		51,5	27	98	93	328,32
37,5	55		87,5	10	69,5	78,5	52,5	28	100	95	335,38
	56		88	11,5	70,5	79	53	29	101	96	338,91

ANEXO B – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA (Continuação)

38	57		89	13	71		54	30	103	98	345,97
38,5	58		90	14,5	72	79,5	54,5	31	104	99	349,5
39	59		90,5	16	73	80	55	32	106	101	356,56
39,5	60		91	17,5	74		56	33,5	107	102	360,09
40	61		91,5	19		80,5	56,5	34,5	108	103	363,62
40,5	62		92	20,5	74,5	58	57	35,5	110	105	370,68
41	63		93	22	75,5	58,5	81	36,5	113	107	377,74
41,5	64		93,5	23,5	76,5	81,5	59,5	37,5	115	109	384,81
	65		94	25	77,5		60	38,5	117	111	391,87
42	66		94,5	26,5	78	82	60,5	39,5	120	113	398,93
42,5	67		95	28	79	82,5	61,5	40,5	125	115	406
43	68		95,5	29,5	80		62	41,5	127	117	413,05
43,5	69		96	31	81	83	62,5	42,5	129	119	420,11
44	70		97	32,5	81,5	83,5	63,5	43,5	131	121	417,17
44,5	71		97,5	34,5	82,5		64	44,5	133	123	434,23
45	72		98	36	83,5	84	65	45,5	135	125	441,29
45,5	73		98,5	37,5	84,5	84,5	66,5	46,5	137	127	448,35
46	74		99	39	85		66	47,5	140	130	458,94
46,5	75		99,5	41	86	85	67	48,5	142	132	466
47	76			42,5	87		67,5	49	146	136	480,13
48	77			44	88	85,5	68	50	147	137	483,65
48,5	78	10		46	88,5	86	69	51	149	139	490,72
49	79			47,5	89,5		69,5	52	151	141	497,77
49,5	80			49,5	90,5	86,5	70	53	154	144	508,36
50	81	11		51	91	87	71	54	157	147	518,95
50,5	82	12		52,5	92		71,5	55	160	150	529,55
51	83			54	93	87,5	72	56	163	153	540,14
52	84	13		56	94	88	73	57	166	156	550,73
52,5	85			57,5	94,5		73,5	58	169	159	561,32
53	86			59,5	95,5	88,5	74	58,5	173	162	571,92
53,5	87	14		61	96,5	89	74,5	59,5	182	169	596,62
54	88	15		62,5	97		75	50	187	172	607,22
55	89			64	98	89,5	75,5	61,5	190	176	621,33
55,5	90			66	98,5	90	76	62,5	195	180	635,46

ANEXO B – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA (Continuação)

56	91	16		67,5	99,5		77	63,5	200	185	653,11
56,5	92	17		69	100	90,5	77,5	64,5	205	190	670,76
57	93			71		91	78	65,5	210	195	688,41
57,5	94	18		72,5			78,5	66	215	200	706,06
58	95			74		91	79	67	220	210	741,37
59	96			76			80	68	225	216	762,55
59,5	97	19		77,5		92	80,5	69	234	222	783,73
60	98	20		79			81	70	240	228	804,92
61	99	21		81		92,5	81,5	71	250	234	826,09
61,5	100	22		82,5		93	82	72	255	240	847,28
62	-101	23		84			82,5	73	260	247	872
62,5	-102	24		85,5		93,5	83	74	270	257	907,3
63	-103	25,5		87			83,5	75	275	261	921,42
64	-104	27		88,5		94	84	76	280	266	939,07
64,5	-105	28,5		90		94,5	84,5	77	290	276	974,37
65		29		91,5			85	78	295	280	988,49
65,5		30		93		95	85,5	79	300	85	1006,1
66		31		94,5			86	80	310	295	1041,5
66,5		32		96		95,5	86,5	81	320	304	1073
67		33		97,5			87	82	330	314	1108
67,5		34,5		99		96	87,5	83	340	323	1140
68		35,5				96,5	88	84	350	333	1175
68,5		36,5					88,5	85	360	342	1207
69		38				97	89	86	370	352	1242
69,5		39				97,5	89,5	87	380	361	1274
70		40					90	88	390	371	1310
70,5		41				98	90,5	89	400	380	1341
71		42				98,5	91	90	410	390	1377
71,5		42,5					91,5	91	420	399	1409
72		43,5				99	92	92	430	409	1444
72,5		44,5					92,5	93	440	418	1476
73		45,5				99,5	93	94	450	428	1511
73,5		46				100	93,5	95	460	437	1543
74		47					94	96	470	447	1578

Fonte: AçosVic

ANEXO C – RESULTADO TESTE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

Resultado do teste de composição do material.

Sample : sanfona 3mm 2							
Operator: Edna							
Comment : ROHS-3mm							
Group : easy-total							
Date : 2013-10-17 17:44:01							
Measurement Condition							

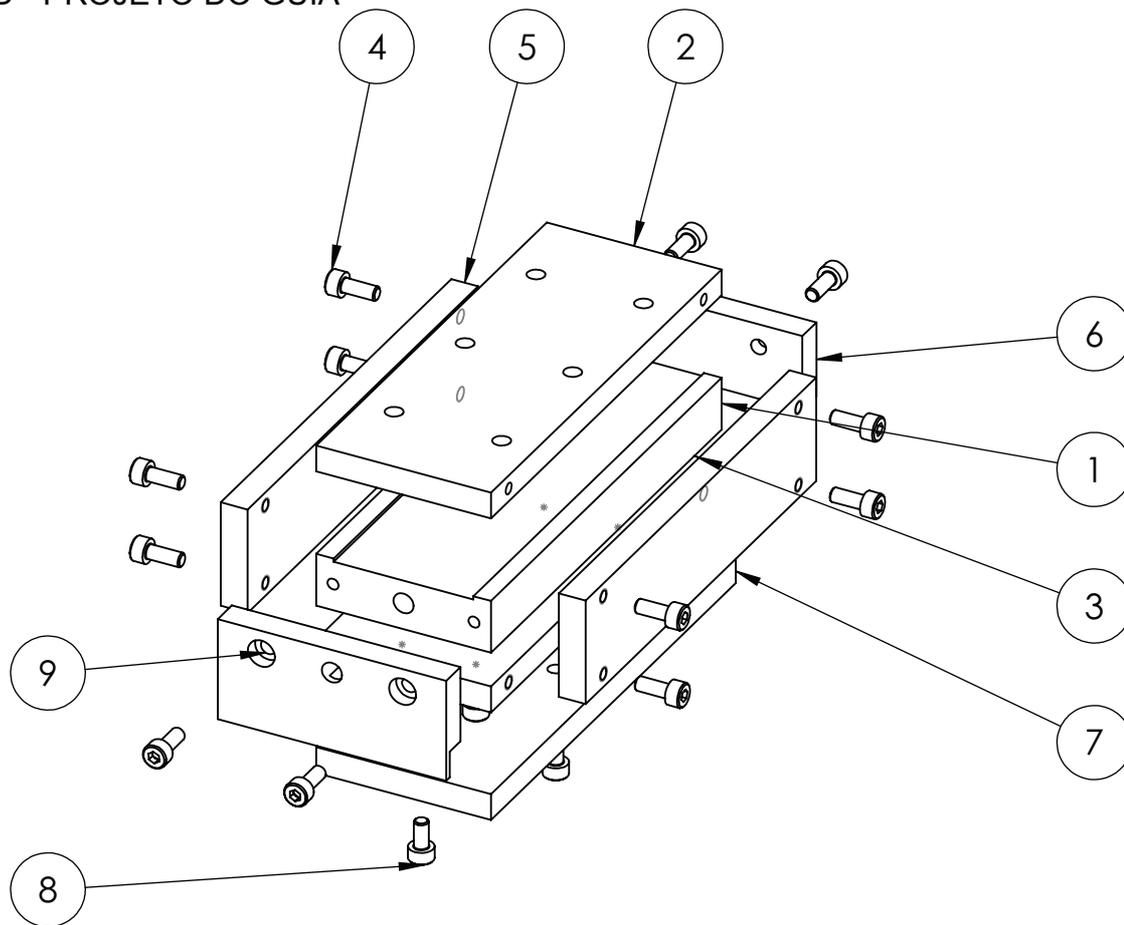
Instrument: EDX-720		Atmosphere: Air		Collimator: 3(mm)		Spin: Off	

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)

Ti-U	Rh 50	64-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 99	39
Rh-Cd	Rh 50	1000-Auto	MoNi	0 - 40	19.50-23.50	Live- 100	2
Zn-As,Pb	Rh 50	1000-Auto	Ag	0 - 40	8.50-13.00	Live- 100	29
S-K	Rh 15	604-Auto	Al	0 - 20	2.10- 3.40	Live- 100	39
Quantitative Result							

Analyte	Result		(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)	

Fe	71.063 %		(0.064)	Quan-FP	FeKa	193.0755	
Cr	17.899 %		(0.027)	Quan-FP	CrKa	69.0724	
Ni	8.801 %		(0.028)	Quan-FP	NiKa	14.9586	
Mn	1.439 %		(0.014)	Quan-FP	MnKa	5.0856	
Cu	0.456 %		(0.008)	Quan-FP	CuKa	1.1098	
Mo	0.275 %		(0.002)	Quan-FP	MoKa	2.3139	
V	0.066 %		(0.004)	Quan-FP	V Ka	0.1965	



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	Material	QTD.
1	Guia	Cobre eletrolítico	1
2	Tampa	Ambatex	1
3	Fundo	Ambatex	1
4	Parafuso allen com cabeça M4x10mm	-	16
5	Lateral	Ambatex	2
6	Encosto	Ambatex	1
7	Suporte	Aço 1020	1
8	Parafuso allen com cabeça M4x8mm	-	4
9	Encosto fio	Ambatex	1

Dimensão	Tolerância
0 - 6 mm	0,10mm
6 - 15 mm	0,20mm
15 - 60mm	0,30mm
60mm - 120 mm	0,40mm
Acima de 120 mm	0,50mm

TÍTULO:
Projeto guia para aquecimento da chapa

DES. Nº

Conjunto Guia

A4
Nº 00

Projetista:
Pablo Buffon Benevenuto

MATERIAL:

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

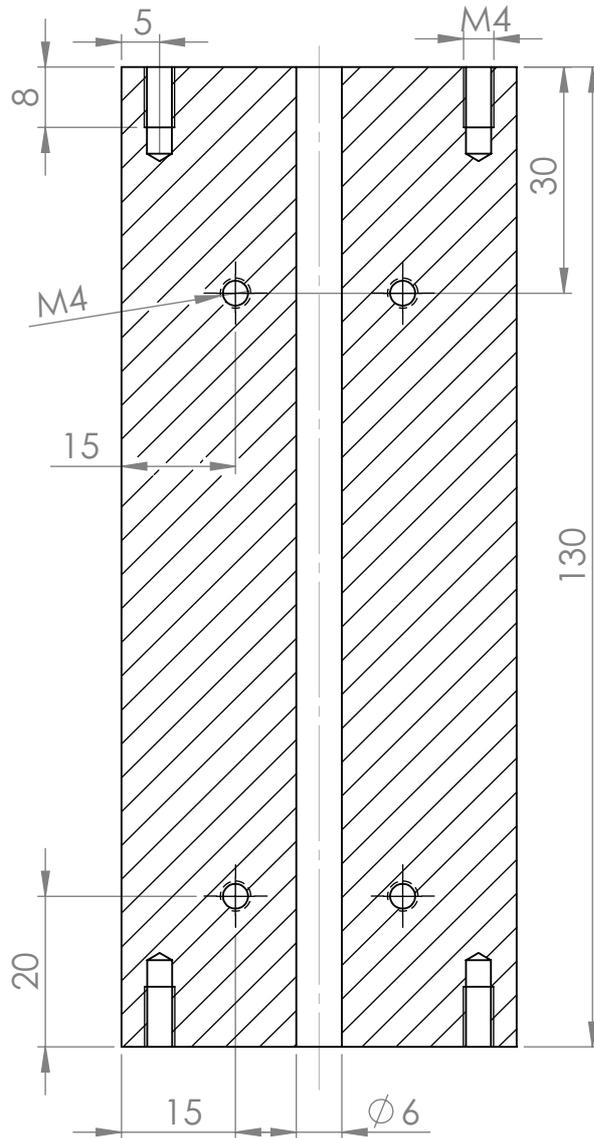
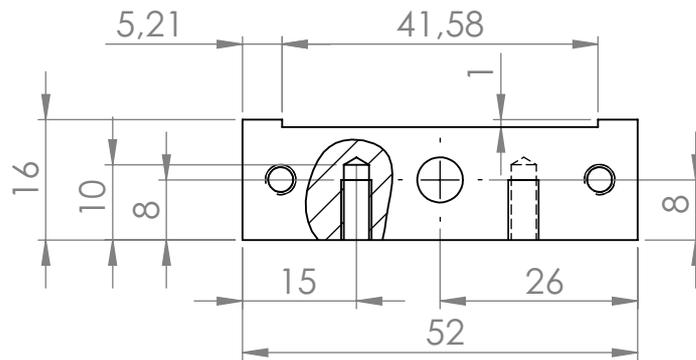


Tabela de tolerâncias não identificadas

Dimensão	Tolerância
0 - 6 mm	0,10mm
6 - 15 mm	0,20mm
15 - 60mm	0,30mm
60mm - 120 mm	0,40mm
Acima de 120 mm	0,50mm

TÍTULO:

Projeto guia para aquecimento da chapa

DES. Nº

Guia

A4

Nº 01

Projetista:
Pablo Buffon Benevenuto

MATERIAL:
Cobre eletrolítico

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

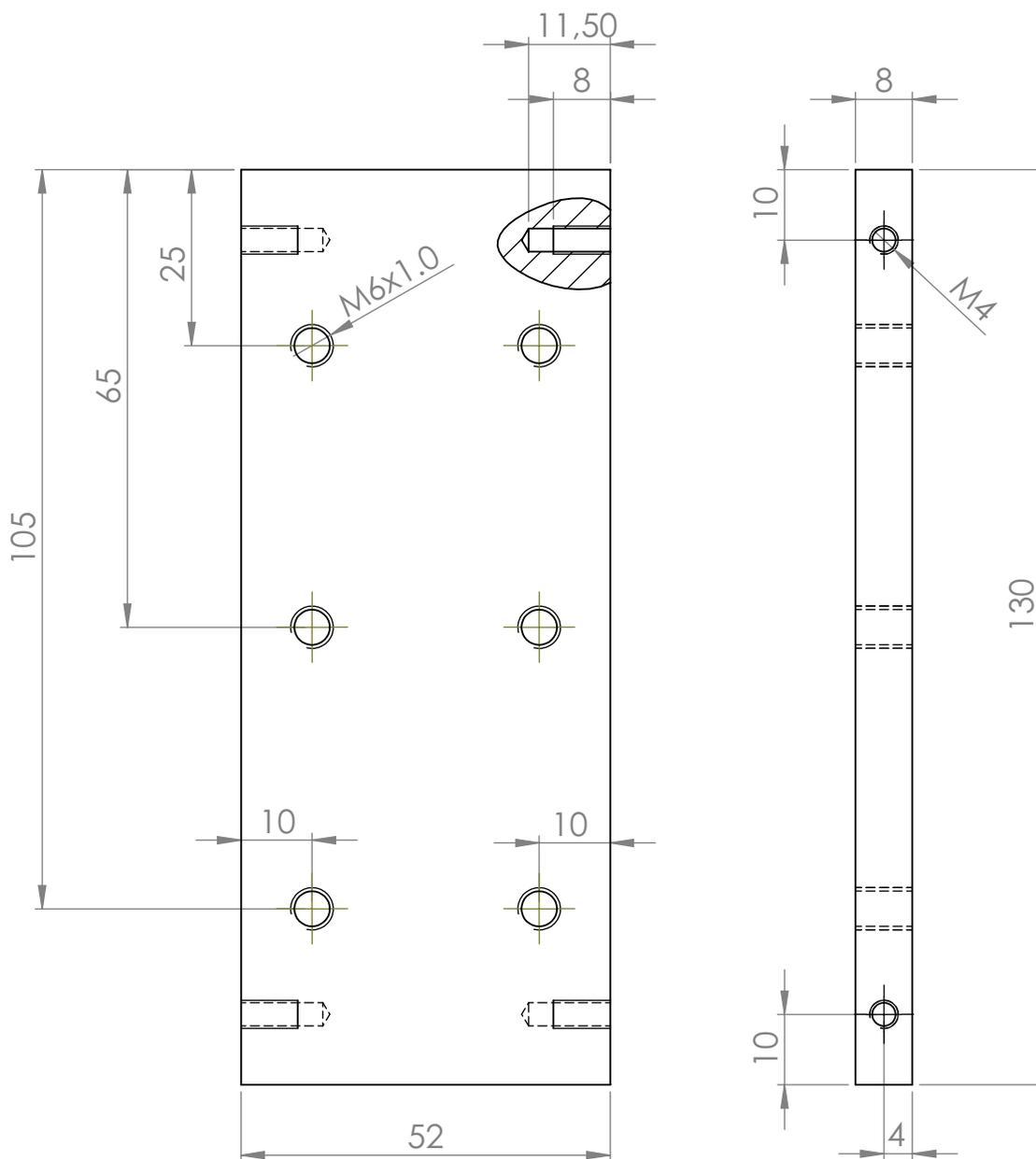


Tabela de tolerâncias não identificadas

Dimensão	Tolerância
0 - 6 mm	0,10mm
6 - 15 mm	0,20mm
15 - 60mm	0,30mm
60mm - 120 mm	0,40mm
Acima de 120 mm	0,50mm

TÍTULO:

Projeto guia para aquecimento da chapa

DES. Nº

Tampa

A4

Nº 02

Projetista:

Pablo Buffon Benevenuto

MATERIAL:

Ambatex

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

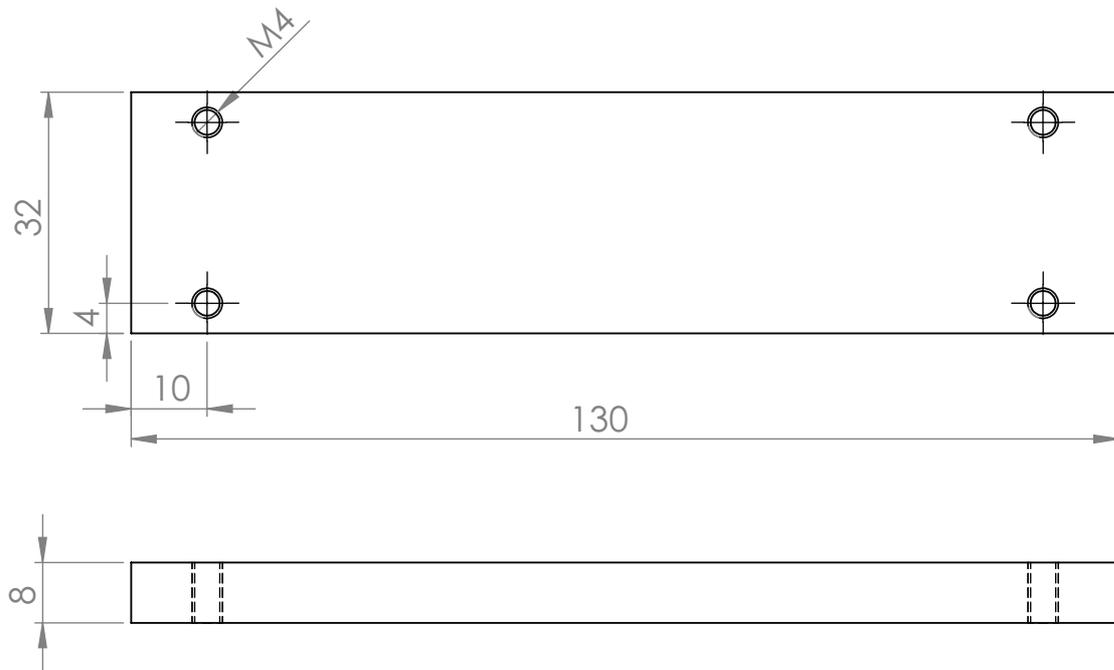
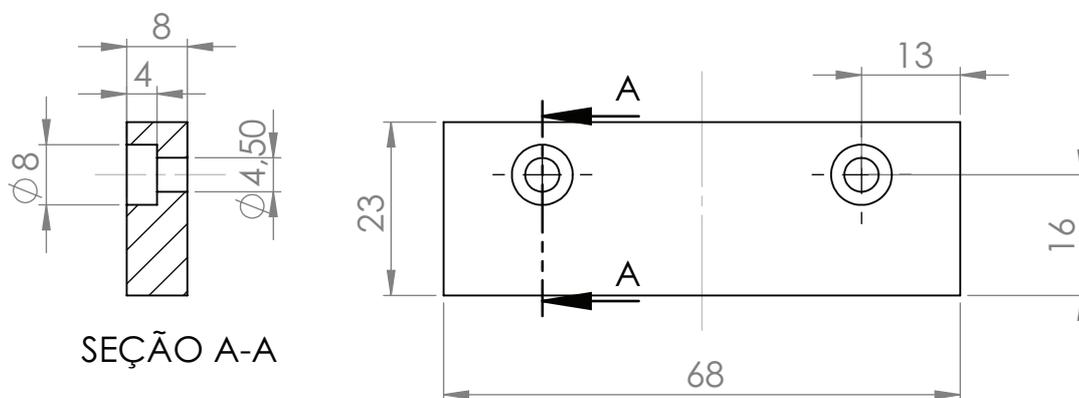


Tabela de tolerâncias não identificadas		TÍTULO:	
Dimensão	Tolerância	Projeto guia para aquecimento da chapa	
0 - 6 mm	0,10mm	DES. Nº	2 peças Lateral
6 - 15 mm	0,20mm		
15 - 60mm	0,30mm		
60mm - 120 mm	0,40mm		
Acima de 120 mm	0,50mm		
Projetoista: Pablo Buffon Benevenuto		MATERIAL: Ambatex	
		ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1
			A4 Nº 05



SEÇÃO A-A

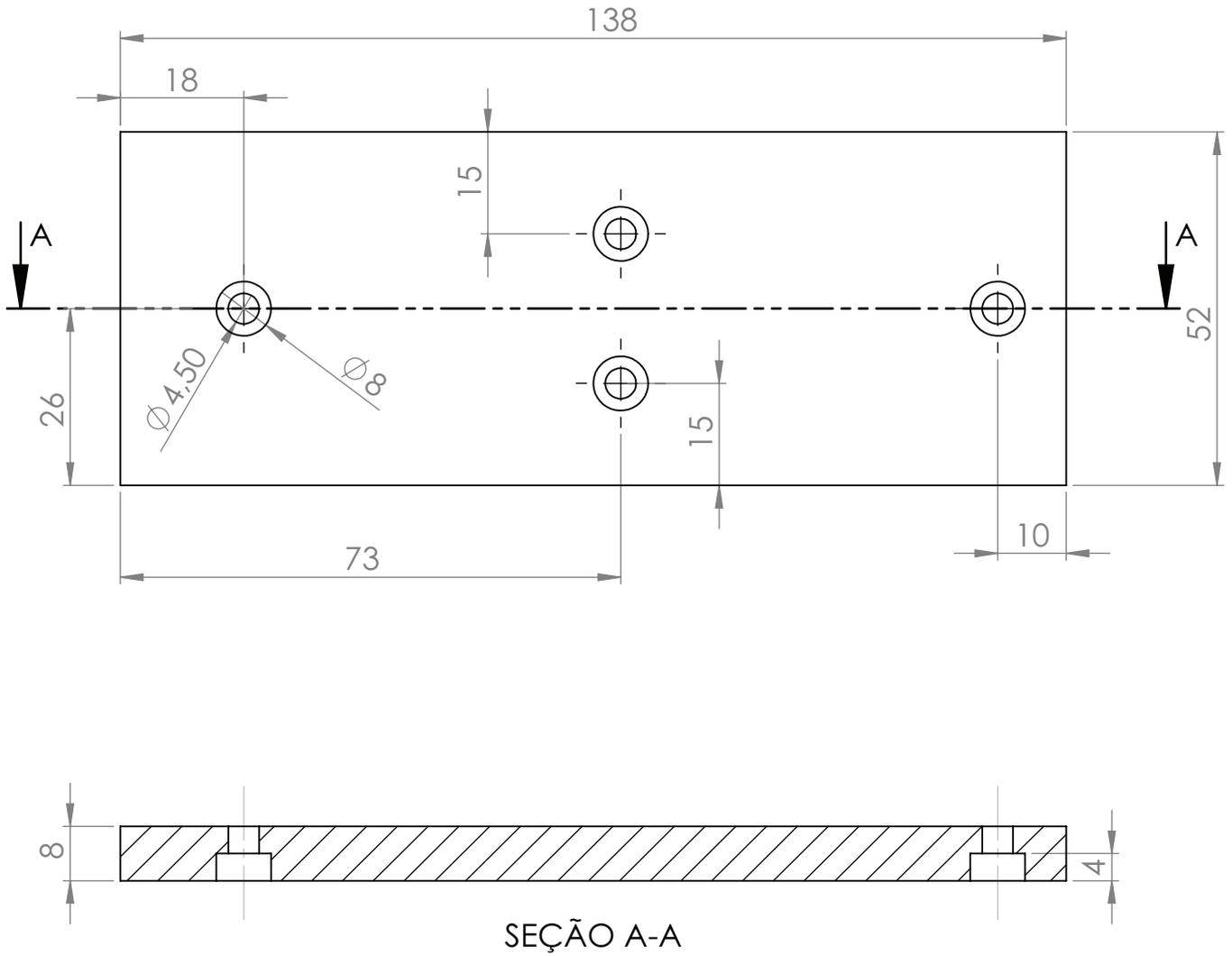
Tabela de tolerâncias não identificadas	
Dimensão	Tolerância
0 - 6 mm	0,10mm
6 - 15 mm	0,20mm
15 - 60mm	0,30mm
60mm - 120 mm	0,40mm
Acima de 120 mm	0,50mm

TÍTULO:
 Projeto guia para aquecimento da chapa

Projetista:
 Pablo Buffon Benevenuto

MATERIAL:
 Ambatex

DES. Nº	<h1>Encosto</h1>	A4
		Nº 06
ESCALA:1:1		FOLHA 1 DE 1



SEÇÃO A-A

Tabela de tolerâncias não identificadas		TÍTULO:	
Dimensão	Tolerância	Projeto guia para aquecimento da chapa	
0 - 6 mm	0,10mm		
6 - 15 mm	0,20mm		
15 - 60mm	0,30mm		
60mm - 120 mm	0,40mm		
Acima de 120 mm	0,50mm	DES. Nº	A4
Projeta: Pablo Buffon Benevenuto		Suporte	
MATERIAL: SAE 1020			
		ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1

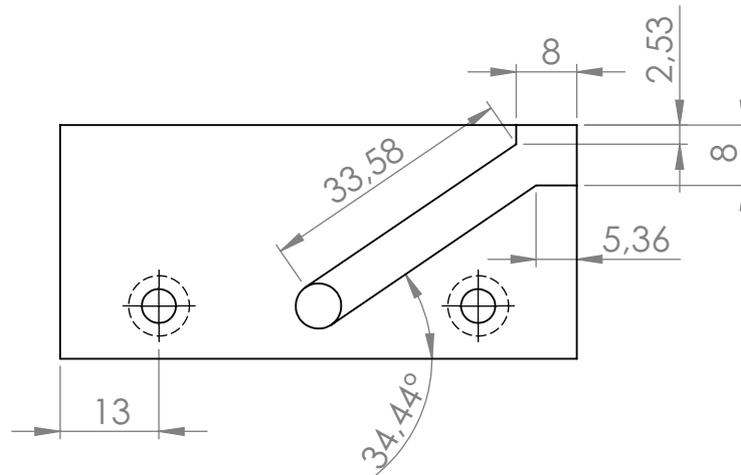
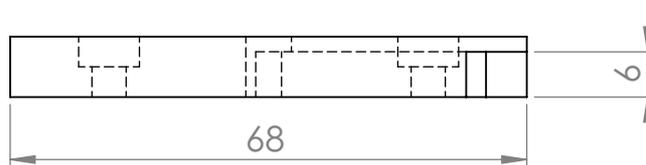
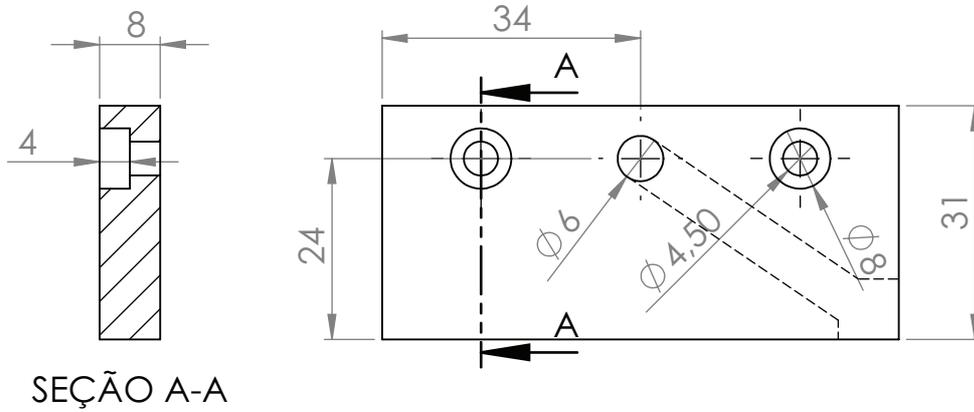


Tabela de tolerâncias não identificadas

Dimensão	Tolerância
0 - 6 mm	0,10mm
6 - 15 mm	0,20mm
15 - 60mm	0,30mm
60mm - 120 mm	0,40mm
Acima de 120 mm	0,50mm

TÍTULO:

Projeto guia para aquecimento da chapa

DES. Nº

Encosto fio

A4

Nº 09

Projetista:
Pablo Buffon Benevenuto

MATERIAL:
Ambatex

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1