



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGE3M

ANÁLISE DE FORÇAS DURANTE PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL  
COM O AUXÍLIO DE EXTENSOMETRIA

Gustavo dos Santos De Lucca

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2015



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais

PPGE3M

ANÁLISE DE FORÇAS DURANTE PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL  
COM O AUXÍLIO DE EXTENSOMETRIA

Gustavo dos Santos De Lucca

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2015

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fábio André Lora (CIMATEC-SENAI/BA)

Prof. Dr. Roderval Marcelino (UFSC – SC/Campus Araranguá)

Prof. Dr. Jovani Castelan (Faculdade SATC – SC)

Prof. Dr. Elvys Isaias Mercado Curi (Faculdade SATC – SC)

Prof. Dr. Carlos Péres Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico a minha esposa Luana, por todo apoio,  
paciência e principalmente motivação concentrados a mim  
durante a elaboração deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer pelo estímulo à pesquisa científica, pela atenção dispensada, pelas informações técnicas e metodológicas aplicadas nessa pesquisa, o agradecimento de maneira mais profunda.

Ao colega Prof. MSc. Daniel Fritzen da SATC, pelas orientações e informações a respeito da pesquisa, dando o caminho correto para seguir e atingir os objetivos definidos.

Ao colega Prof. Dr. Anderson Daleffe da SATC, pelo suporte técnico na execução dos Ensaio e disponibilidade pela fabricação do ferramental necessário, além da aplicabilidade e operação dos equipamentos. Agradeço também pelas contribuições no que tangem o assunto.

Ao colega Prof. Jose Luiz Salvador da SATC, pelas contribuições em temas relacionados à Resistência dos Materiais.

Ao colega Prof. MSc. Fernando Michelin Marques e Prof. Fabiano Medeiros Ugioni ambos da SATC, aliados na pesquisa do tema de Extensometria, que contribuíram para a pesquisa evoluir e elucidar diversos momentos.

Ao colega Valter Marcelino do LAMETRO, da SATC, pela ajuda e fornecimentos de materiais necessários para pesquisa.

Ao colega Daniel Basilio Marcelo que auxiliou no uso de softwares para processamento de sinais e geração de informação.

Aos bolsistas Lucas Guedes e Artur Cavaler da SATC, que serviram de apoio técnico e de operação para que a pesquisa se concretizasse.

Ao LdTM pela contribuição e suporte na resolução de dúvidas pertinentes a pesquisa.

À Faculdade SATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas para a execução dos experimentos práticos da dissertação.

À todos os colegas da SATC que colaboraram direta e/ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. Justificativa.....	18
1.2. Objetivo Geral .....	19
1.3. Objetivos Específicos e Metodologia.....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1. Estampagem Incremental .....	21
2.2. Extensometria.....	26
2.2.1. Extensômetros .....	27
2.2.1.1. Confecção dos Extensômetros.....	32
2.2.1.2. Tipos de Extensômetros .....	33
2.2.2. Escolha e Especificações dos Extensômetros.....	35
2.2.3. Colas e Procedimentos de colagem .....	37
2.3. Sistemas de Medição de Extensômetros .....	38
2.3.1. Técnicas de Medição .....	41
2.3.2. Normas e Calibração de Sistemas .....	42
2.3.3. Erros de Medição .....	44
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
3.1. Confecção de Ferramenta, Escolha e Colagem de Extensômetros.....	46
3.2. Soldagem de Filamentos e Leitura de Sinais.....	47
3.3. Processamento de Sinais de Calibração dos Extensômetros .....	50
3.4. Controle de Temperatura.....	53
3.5. Cálculos Analíticos do Momento Fletor da Ferramenta.....	55
3.6. Simulação Numérica .....	59
3.7. Validação da calibração dos extensômetros .....	61
3.8. Coeficientes de força para ISF .....	63
3.9. Teste preliminares .....	64
3.10. Análise Experimental - Estampagem Incremental (ISF).....	67

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
4.1. Resultado <i>Incremental Sheet Forming</i> para $s_0 = 0,5\text{mm}$ .....	75
4.2. Resultado <i>Incremental Sheet Forming</i> para $s_0 = 0,7\text{mm}$ .....	76
4.3. Resultado <i>Incremental Sheet Forming</i> para $s_0 = 1,0\text{mm}$ .....	78
4.4. Resultado <i>Incremental Sheet Forming</i> para todos os Ensaios.....	79
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>85</b>
<b>7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE A: TABELA DE AUTOCOMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA DOS EXTENSÔMETROS USADOS NOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE B: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 01 – CHAPA COM <math>S_0 = 0,5\text{MM}</math> E <math>\Psi = 58^\circ</math>.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE C: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 04 – CHAPA COM <math>S_0 = 0,7\text{MM}</math> E <math>\Psi = 57^\circ</math>.....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE D: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 05 – CHAPA COM <math>S_0 = 1\text{MM}</math> E <math>\Psi = 57^\circ</math>.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE E: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 06 – CHAPA COM <math>S_0 = 0,7\text{MM}</math> E <math>\Psi = 58^\circ</math>.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE F: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 07 – CHAPA COM <math>S_0 = 1\text{MM}</math> E <math>\Psi = 58^\circ</math>.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE G: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 08 – CHAPA COM <math>S_0 = 0,7\text{MM}</math> E <math>\Psi = 59^\circ</math>.....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE H: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 – ENSAIO 09 – CHAPA COM <math>S_0 = 1\text{MM}</math> E <math>\Psi = 59^\circ</math>.....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Blocos do estudo teórico/experimental. ....	19
Figura 2 – Processo de Estampagem de Ponto Simples (SPIF). Adaptado de [21]. ....	22
Figura 3 – Representação Gráfica dos Processos de SPIF (a) e TPIF (b). Adaptado de [3]. ....	23
Figura 4 – Desenho de máquina dedicada de ISF desenvolvido por Allwood et al (2005). ....	23
Figura 5 – Máquina comercial da empresa Amino Corporation [24]. ....	24
Figura 6 – Double-sided incremental forming (DSIF) [26]. ....	24
Figura 7 – ISF dupla - Duplex incremental forming (DPIF) [22]. ....	25
Figura 8 – Curva tensão-deformação [1]. ....	28
Figura 9 – Deformação de um fio sobre tração [36]. ....	29
Figura 10 – Extensômetros de lâmina [36]. ....	30
Figura 11 – Esquema de construção de extensômetro [36]. ....	32
Figura 12 – Esquema de identificação da Excel Sensores. ....	36
Figura 13 – Esquema de identificação utilizado pela MicroMeasurements. ....	36
Figura 14 – Esquema de identificação da KYOWA. ....	37
Figura 15 – Circuito em ponte de Wheatstone. ....	38
Figura 16 – Circuito de resistores em série. ....	39
Figura 17 – Esquema de pontes de Wheatstone e Hidráulica [36]. ....	40
Figura 18 – Esquema básico de medição com extensômetros. ....	42
Figura 19 – Ferramenta em Aço 4340 com extensômetros fixados. ....	47
Figura 20 – Extensômetro Excel modelo PA-06-250BA-350-L com detalhes de filamento. ....	48
Figura 21 – Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) QuantumX MX840B [62]. ....	48
Figura 22 - Software Quantum X (a) e Catman Easy (b). ....	49
Figura 23 – Detalhe da configuração de Fator de Sensibilidade K do extensômetro. ....	49
Figura 24 - Pesos com massa especificada. ....	50
Figura 25 - Ferramenta presa a morsa de bancada para calibração de extensômetros. ....	51
Figura 26 – Calibração Sensor S1 e Sensor S3 a partir de colocação de pesos. ....	51
Figura 27 – Deformação relativa ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) em função do Tempo (s) de Deslocamento da ferramenta obtidos nos Sensores S1 (A) e S3 (B) durante a colocação dos pesos de 5kg, 10kg, 15kg e 20kg. ....	52
Figura 28 – Calibração para as forças conhecidas aplicadas para os Sensores S1 e S3, com os respectivos desvios padrão. ....	53
Figura 29 – Termovisor Fluke Ti32[63]. ....	54
Figura 30 – Controle de Temperatura durante a calibração. ....	54
Figura 31 - Exemplificação de momento fletor na ferramenta de ISF. ....	55
Figura 32 - Detalhes do Centróide da Ferramenta. ....	55
Figura 33 – Representação da parte retirada da ferramenta. ....	57
Figura 34 – Simulação Numérica com carga de 196,2N com detalhamento de Sensor S1. A) Vista Lateral e B) Vista Superior. ....	59
Figura 35 - Simulação Numérica com carga de 196,2N com detalhamento de Sensor S3. Vista Lateral (A) e Vista Superior (B). ....	60
Figura 36 – Ensaio preliminar 04 com chapa de 0.5mm, observando-se os dados de compressão para o Sensor S3. A) Vista Superior e B) Vista Frontal. ....	65
Figura 37 – Chapa sendo estampada observando-se os pontos definidos na leitura do sinal. ....	65
Figura 38 – Dados obtidos para o Sensor S1 em experimento preliminar. A) Tração e B) Compressão. ....	66
Figura 39 – Dados obtidos para o Sensor S3 em experimento preliminar. A) Tração e B) Compressão. ....	67
Figura 40 – Sinal obtido a partir de ensaio preliminar com chapa de $s_0 = 0,5\text{mm}$ comportamento do Sensor S3 em estado de compressão. ....	67

Figura 41 – a) Projeto do Blank, b) Simulação da ISF.....	68
Figura 42 – Visão inferior dos Ensaios executados. ....	69
Figura 43 – Imagens termográficas ISF. A) Detalhe Sensor S3 Ensaio 01. B) Detalhe Sensor S1 Ensaio 04.....	70
Figura 44 – Variação da Temperatura ( $\Delta T$ °C) no corpo da ferramenta durante processo de ISF. ....	70
Figura 45 – Croqui dos sentidos das forças de Estampagem. ....	71
Figura 46 – Detalhe do sinal adquirido para os Sensores S1 e S3 no Ensaio 01 sendo a chapa com $s_0 = 0,5\text{mm}$ com $\Psi = 58^\circ$ . ....	71
Figura 47 – Forças (N) nos eixos X e Y para o Ensaio 01 com chapa de espessura $s_0 = 0,5\text{mm}$ com ângulo de parede de $\Psi = 58^\circ$ . ....	72
Figura 48 – Sinal completo medido do Ensaio 02, chapa com espessura de $s_0 = 0,5\text{mm}$ com ângulo de parede de $\Psi = 59^\circ$ . ....	73
Figura 49 – Sinal completo aquisitado no Ensaio 03 com comportamento normal de leitura das forças, chapa com espessura $s_0 = 0,5\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ . ....	74
Figura 50 – Forças $F_x$ (N) e $F_y$ (N) sobrepostas como forma de validação de amplitudes para Ensaio 03.....	74
Figura 51 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,5\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ e $\Psi = 58^\circ$ .....	75
Figura 52 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,5\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ e $\Psi = 58^\circ$ .....	76
Figura 53 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,7\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ , $\Psi = 58^\circ$ e $\Psi = 59^\circ$ . ....	77
Figura 54 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,7\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ , $\Psi = 58^\circ$ e $\Psi = 59^\circ$ . ....	77
Figura 55 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 1,0\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ e $\Psi = 58^\circ$ .....	78
Figura 56 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com $s_0 = 1,0\text{mm}$ com $\Psi = 57^\circ$ e $\Psi = 58^\circ$ .....	78
Figura 57 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] em tração para os 08 (oito) ensaios. ....	79
Figura 58 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] em compressão para os 08 ensaios. ....	80
Figura 59 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] em tração para os 08 ensaios. ....	80
Figura 60 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] em compressão para os 08 Ensaios. ....	81
Figura 61 – Média das forças nos Eixos X e Y ( $F_x$ ) [N] e ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,5\text{mm}$ de espessura. ....	81
Figura 62 – Média das forças nos eixos X e Y ( $F_x$ ) [N] e ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 0,7\text{mm}$ de espessura. ....	81
Figura 63 – Média das forças nos eixos X e Y ( $F_x$ ) [N] e ( $F_y$ ) [N] para chapas com $s_0 = 1,0\text{mm}$ de espessura. ....	82
Figura 64 – Média das forças nos eixos X e Y para todas as chapas ensaiadas. ....	82

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Dados adquiridos e calculados a partir dos extensômetros na ferramenta. ....	53
Tabela 2 – Tabela de autocompensação de temperatura. ....	54
Tabela 3 – Dados comparativos entre Cálculo Analítico, Simulação Numérica e Leitura do extensômetro para o Sensor S1. ....	62
Tabela 4 – Dados comparativos entre Cálculo Analítico, Simulação Numérica e Leitura do extensômetro para o Sensor S3. ....	62
Tabela 5 – Características Técnicas do Centro de Usinagem usado nos experimentos. ....	67
Tabela 6 – Parâmetros usados nos experimentos de ISF.....	68

**LISTA DE ABREVIATURAS**

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ASCII	Código padrão americano para intercâmbio de informações ( <i>American Standard Code for Information Interchange</i> )
CAD	Desenho assistido por computador ( <i>Computer Aided Design</i> )
CAE	Engenharia assistida por computador ( <i>Computer Aided Engineering</i> )
CAI	Inspeção assistida por computador ( <i>Computer Aided Inspection</i> )
CAM	Manufatura assistida por computador ( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
CAPP	Planejamento de Processos assistido por computador ( <i>Computer Aided Process Planning</i> )
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DAQ	Sistema de Aquisição de Dados ( <i>Data Acquisition System</i> )
DIN	Instituto Alemão de Normalização ( <i>Deutsches Institut für Normung</i> )
DSIF	Estampagem Incremental de lado duplo ( <i>Double-sided Incremental Forming</i> )
DPIF	Estampagem Incremental dupla ( <i>Duplex Incremental Forming</i> )
HBM	<i>Hottinger Baldwin Messtechnik</i>
ISF	Estampagem Incremental de Chapas ( <i>Incremental Sheet Forming</i> )
NI	<i>National Instruments</i>
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SELCOM	Temperatura de autocompensação ( <i>Self-compensation temperature</i> )
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Único ( <i>Single Point Incremental Forming</i> )
SN	Simulação Numérica
TPIF	Estampagem Incremental de Ponto Duplo ( <i>Two Point Incremental Forming</i> )
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Área da Seção Transversal do fio	[mm <sup>2</sup> ]
$A$	Momento A no experimento preliminar	[ - ]
$b$	Largura da seção retangular do Extensômetro	[mm]
$B$	Momento B no experimento preliminar	[ - ]
$C$	Momento C no experimento preliminar	[ - ]
$C_{ap}$	Carga aplicada	[N]
$C_{cal}$	Carga calculada a partir dos dados conhecidos	[N]
$d$	Distância da aplicação da carga	[mm]
$D$	Momento D no experimento preliminar	[ - ]
$d_0$	Diâmetro inicial	[mm]
$d_{1H}$	Diâmetro comprimido	[mm]
$ds_1$	Distância da aplicação da carga ao meio do Sensor S1	[mm]
$ds_3$	Distância da aplicação da carga ao meio do Sensor S3	[mm]
$e$	Tensão Elétrica	[V]
$e_{AD}$	Tensão elétrica entre o ponto AD da ponte de Wheatstone	[V]
$e_{Ab}$	Tensão elétrica entre o ponto AB da ponte de Wheatstone	[V]
$F$	Força	[N]
$F_x$	Força no eixo X da ferramenta	[ N ]
$F_y$	Força no eixo Y da ferramenta	[ N ]
$g$	Gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$I_{cm}$	Momento de Inércia em relação ao um eixo paralelo	[mm <sup>4</sup> ]
$I_p$	Momento de Inércia em um ponto arbitrário P	[mm <sup>4</sup> ]
$I_z$	Momento de Inércia em Z	[mm <sup>4</sup> ]
$I_z'$	Momento de Inércia da parte retirada da ferramenta	[mm <sup>4</sup> ]
$K$	Sensibilidade a deformação do material metálico do Extensômetro	[ - ]
$K_s$	Fator de correção do Extensômetro	[ - ]
$l_0$	Comprimento inicial	[ mm ]
$ln$	Logaritmo natural	[ - ]

$m$	Constante proporcional de Extensômetro	[mV]
$M$	Momento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$r$	Raio da Circunferência	[mm]
$R$	Resistência elétrica	[ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistor da Ponte de Wheatstone	[ $\Omega$ ]
$R_3$	Resistor da Ponte de Wheatstone	[ $\Omega$ ]
$R_4$	Resistor da Ponte de Wheatstone	[ $\Omega$ ]
$R_T$	Raio da Ferramenta	[ mm ]
$S$	Área da parte retirada da ferramenta	[ mm <sup>2</sup> ]
$s_0$	Espessura Inicial	[ mm ]
$s_1$	Espessura Final	[ mm ]
$S_1$	Sensor S1	[mV]
$S_2$	Sensor S2	[mV]
$S_3$	Sensor S3	[mV]
$S_4$	Sensor S4	[mV]
$t$	Espessura da lâmina do Extensômetro	[mm]
$Var$	Varição	[%]
$V_{fh}$	Velocidade de Avanço	[ mm/min ]
$V_z$	Velocidade de Mergulho	[ mm/min ]
$V_c$	Velocidade de Rotação	[ rpm ]
$X$	Eixo x da máquina-ferramenta	[ - ]
$y$	Distância do ponto de medição ao eixo centroide da seção	[mm]
$Y$	Eixo y da máquina-ferramenta	[ - ]
$y'$	Diferença entre o centroide da seção com a nova geometria	[mm]
$Z$	Eixo z da máquina-ferramenta	[ - ]

### LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica do aço	[ °C ]
$\sigma$	Tensão	[ MPa]

$\sigma_x$	Tensão normal em x	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{XS1}$	Tensão normal em x para Sensor S1	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{XS3}$	Tensão normal em x para Sensor S3	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Cal}$	Tensão Calculada Analiticamente	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Exp}$	Tensão Experimento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{SN}$	Tensão Simulação Numérica	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\Delta\rho$	Variação da Resistividade do material elétrico	[ $\Omega$ ]
$\Delta l$	Variação do Comprimento	[ mm ]
$\Delta R$	Variação da Resistência	[ $\Omega$ ]
$\Delta V$	Variação da Tensão elétrica	[mV]
$\Delta Z$	Passo Vertical	[ mm ]
E	Módulo de Elasticidade	[ GPa ]
$\varepsilon$	Deformação relativa	[ % ]
$\varepsilon_{Aq}$	Deformação aqisitada pelo Sistema de Medição	[ - ]
$\pi$	Coefficiente piezo-resistivo	[ $\Omega$ ]
$\rho$	Resistividade do material elétrico	[ $\Omega$ ]
$\nu$	Coefficiente de <i>Poisson</i>	[ - ]
$\Psi$	Ângulo de Parede	[ ° ]

## RESUMO

O presente trabalho possui o objetivo de avaliar a aplicabilidade da metrologia em uma ferramenta de estampagem incremental de chapas. Para o estudo foi confeccionada uma ferramenta de estampagem com rebaixos em seu corpo cilíndrico para a fixação dos sensores que mediram a deformação relativa. As análises apresentadas nesta pesquisa representam os cuidados e processos necessários ao uso de extensômetros aliado a um processo de fabricação mecânica. No presente estudo define-se a calibração de um sistema de medição da deformação superficial da ferramenta de estampagem com auxílio da Extensometria. Para validar os resultados obtidos pelos métodos da instrumentação das medidas das deformações e forças no processo de estampagem incremental foram utilizados os métodos de Cálculos Analíticos e Simulação Numérica por meio de softwares de Elementos Finitos. No método de medida se considerou parâmetros que podem comprometer os valores medidos tais como a medida da temperatura utilizando equipamentos termovisor. Além disso, foram realizados 04 (quatro) ensaios preliminares com o intuito de avaliar a medição de forma satisfatória nos eixos X e Y do processo de estampagem incremental, efetuando análises das forças nesses eixos em tração e compressão. A estampagem incremental ocorreu por meio de um total de 09 (nove) Ensaios variando-se ângulo de parede ( $\psi$ ) e espessura das chapas ( $s_0$ ). Os experimentos baseiam-se na variante de estampagem incremental denominada Estampagem Incremental de Ponto Simples (*SPIF – Single Point Incremental Forming*). Para a execução dos testes práticos foram utilizados recursos de hardware como Ponte *Wheatstone*, extensômetros, Termovisor, Centro de Usinagem CNC, matriz incremental, ferramenta de estampagem incremental e um dispositivo prensa chapas. Além de recursos de software CAD/CAM, DAQ (*Data Acquisition System*), Análise de Elementos Finitos. E recursos de cálculos analíticos como forma comprobatória de resultados. A partir dos procedimentos executados junto com aparato tecnológico foi possível efetuar as análises e medições das forças na ferramenta de estampagem incremental com referência aos eixos X e Y. Demonstrando neste a aplicabilidade de extensometria para leitura e análise de forças no processo de ISF.

**Palavras-chave:** Estampagem Incremental, Extensometria, Análise de Forças, Simulação Numérica.

## ABSTRACT

This present work has the objective of assessing the applicability of instrumentation science in an incremental forming tool. For this study was made a tool with recesses on its cylindrical body as a means of fixing the strain sensors. The study presented demonstrate some of the warning and processes required the use of Strain Gages combined with a mechanical manufacturing process. In the present study is defined as an acceptable calibration measuring system with the aid of Extensometry. To validate the results obtained by the methods of instrumentation measurements of the deformations and forces in incremental sheet forming process were used Analytical Calculations and Numerical Simulation using Finite Elements. The measurement method was considered parameters that can compromise the measured values such as temperature measurement devices using thermometer. In addition, we conducted four (04) preliminary tests in order to evaluate the measurement system in satisfactory form with measured variables such as X and Y axes. We analyses the traction and compression forces in both axes. After the preliminary step, was performed a total of nine (09) tests with incremental sheet forming process, varying wall angle ( $\psi$ ) and the thickness ( $s_0$ ). The experiments are based on the Single Point Incremental Forming - SPIF. For the implementation of the practical tests were used hardware resources such as CNC Machining Center, Wheatstone Bridge, Strain Gauges, Thermal Imager, incremental matrix and incremental forming tool. Besides, we used softwares such as CAD/CAM, DAQ (Data Acquisition System) and Finite Element Analysis. From the technological procedures perform with apparatus was possible do carry out the analyzes and measurement of forces in incremental sheet forming tool increases about to the axes X and Y. Demonstrating the applicability of the extensometry for reading and analyzing forces in the ISF process.

**Key-words:** Incremental Sheet Forming, Extensometry, Forces Analyze, FEA.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente em nossa sociedade existe uma grande dependência de metais. Em qualquer parte, podemos observar o uso de metais em situações cotidianas como em fios de cobre, na construção civil, diversas ligas de aço, nos transportes e ferramentas. Cada vez mais o avanço da tecnologia nas mais diversas áreas de atuação vem refletindo em nossos cotidianos. A utilização dos metais, sejam puros ou em ligas, neste contexto é evidente. A indústria metal-mecânica vem fornecendo seus alvitres desde a condição do produto final, até componentes necessários a outras atividades industriais [1].

A conformação mecânica tem um papel de grande importância na indústria, já que é uma forma de produzir peças com excelentes propriedades mecânicas com uma perda mínima de material. Deste modo, é importante observar que dentre os muitos processos usados na indústria metal-mecânica, a ISF tem destaque significativo nesta área, tendo como vantagens a possibilidade de utilização da mesma ferramenta para a fabricação de perfis de formatos variados, a ampliação da característica de conformabilidade de chapas, e a viabilidade para a produção de pequenos lotes de peças, peças unitárias e protótipos [2][3].

O processo de ISF baseia-se no deslocamento de um punção, acionado por uma prensa, contra uma ferramenta, comumente chamada de matriz, onde se encontra a chapa metálica. Conforme características geométricas do punção e da matriz, a chapa metálica plana assumirá o formato imposto por ambos. Pode-se citar diversas indústrias como sendo beneficiárias deste processo, tais como a indústria automotiva, máquinas agrícolas, aeroespacial, aparelhos e utensílios domésticos, construção civil, medicina, transportes, indústria eletroeletrônica, entre outras [4].

No desenvolvimento do processo a indústria começou a utilizar prensas para atender às demandas, levando em consideração redução de custos e tempos de fabricação. Porém, evidenciou-se diversas desvantagens como, por exemplo, uma única ferramenta para cada produto a ser estampado, comumente chamado de punção (matriz, prensa-chapas, etc). Para se ter ferramentas dedicadas, é necessário um custo elevado, impactando no produto final. Diante desta situação, deve-se utilizar ferramentas dedicadas somente em grandes volumes de peças em produção [5].

Visando a customização, a diferenciação, personalização, redução de custos, diminuição do “*lead-time*”<sup>1</sup>[6] e produção sustentável, nas buscas incessantes da indústria, surge a estampagem incremental de chapas por meio de ferramentas dedicadas, sempre respeitando a fabricação de pequenos lotes ou modelos únicos. O processo de Estampagem Incremental de Chapas (*Incremental Sheet Forming – ISF*) é uma inovação tecnológica na área de deformação de chapas. Consiste na deformação de uma geratriz, utilizando um punção podendo se comandado por controle numérico (CNC) que vai deformando aos poucos a peça por meio de pequenas deformações [1][3][7].

O processo consiste na estampagem de chapas de metal de forma rápida e com razoável precisão a partir de arquivos CAD em 3D, a trajetória da ferramenta é gerada por tecnologia CAM e controlada por programa CNC, que vai formando aos poucos a peça, por meio de pequenas deformações [8]. Utiliza uma ferramenta semiesférica, que pode ser aplicada para vários diferentes formatos geométricos. A chapa é presa sobre um dispositivo desenvolvido para a tecnologia ISF. A máquina de ISF pode ser um centro de Usinagem CNC adaptado, um robô também adaptado ou máquinas desenvolvidas para a ISF [9].

Este processo foi patenteado por Edward Leszak [10], objetivando fornecer avanços no estado da arte da conformação de chapas de metal dúctil em um espaço vazio, podendo ser trabalhado ou deformado plasticamente nas configurações desejadas utilizando ferramentas simples e baratas com formas cônicas de revolução.

### 1.1. Justificativa

Numerosas pesquisas e aplicações industriais da ISF fazem uso de Centros de Usinagem ou outros dispositivos com configurações semelhantes. [2] [3] [11] Embora a técnica já esteja difundida a muito tempo, não há estudos aprofundados no Brasil sobre as forças que atuam sobre os eixos X, Y e Z destas máquinas. Não conhecendo os valores e vetores de forças, não há como saber se o equipamento está sendo sobrecarregado ou não. Por outro lado, o desconhecimento acerca das forças impede o desenvolvimento de uma máquina específica de ISF, já que o dimensionamento da estrutura física deve levar em conta essas forças. Apresenta-

---

<sup>1</sup> *Lead-time* ou tempo de atravessamento ou ainda ciclo, na literatura remete a duas grandezas, sendo (a) em suprimentos, tempos relacionados as reposições de materiais e (b) em produção tempos relacionados ao atendimento das demandas de clientes. Sendo assim, *lead-time* pode ser considerado o tempo de atravessamento referente a transformação de matérias-primas em produtos acabados [6].

se na Figura 1 um diagrama de blocos dos trabalhos executados neste estudo como forma de situar o desenvolvimento teórico e experimental do trabalho.

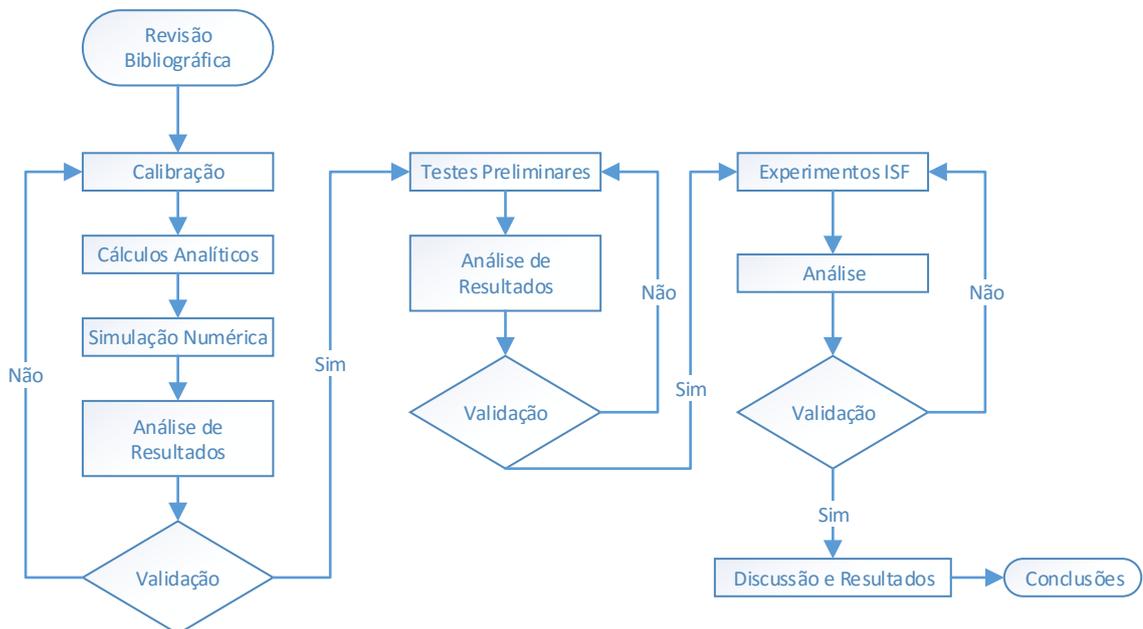


Figura 1 – Diagrama de Blocos do estudo teórico/experimental.

## 1.2. Objetivo Geral

Considerando o desconhecimento das forças atuantes nas ferramentas de estampagem incremental, este estudo visa obter e analisar os valores das forças atuantes sobre a ferramenta de estampagem, durante o processo de estampagem incremental.

## 1.3. Objetivos Específicos e Metodologia

Será efetuado um trabalho teórico, experimental e prático com os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar Extensometria na ferramenta de Estampagem Incremental;
- Determinar um método de calibração para medição com extensômetros aplicado a Estampagem Incremental;
- Comparar os resultados medidos com os dados de simulação numérica e cálculos analíticos;
- Executar testes preliminares para validação de funcionamento de extensômetros;
- Analisar forças atuantes na Ferramenta de Estampagem;
- Analisar influência da temperatura na medição com extensômetros;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A área de conformação mecânica de chapas abrange uma grande variedade de processos de fabricação como cisalhamento, dobramento, laminação, forjamento, trefilação, extrusão, repuxo, entre outros ou uma combinação destes processos são usadas para produzir e aplicar em uma infinidade de aplicações. Muitos dos processos de conformação necessitam componentes específicos tornando o processo oneroso seja pelo tempo de preparação de ou pelos custos envolvidos [1].

No competitivo mercado industrial, a demanda dos clientes está cada vez mais cercada por customizações, serviços de qualidade, produtos com estética favorável sendo estes apresentando aproximadamente os mesmos custos e com melhor qualidade. Para atender a este tipo de demanda do mercado, empresas estão usando processos de fabricação auxiliados por ferramentas computacionais, ou *Computer-Aided*, como: CAD – Desenho Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*); CAE – Engenharia Assistida por Computador (*Computer-Aided Engineering*); CAPP – Planejamento de Processo Assistidos por Computador (*Computer-Aided Process Planning*); CAM – Manufatura Assistida por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*); CAI – Inspeção Assistida por Computador (*Computer-Aided Inspection*), entre outros. Isto faz com que os processos de manufatura rompam as barreiras físicas departamentais de uma organização [12].

Para que a indústria seja competitiva nessa era de customização, é necessário a conversão de ideias rapidamente em produtos flexíveis e de rápida prototipação usufruindo dos benefícios de tecnologias de CAX. A personalização em massa deve ser perseguida pela indústria com o intuito de entregar um produto mais rápido, mais barato e de maior qualidade ao cliente. Fabricantes tentam competir não só na questão de custos de produção, mas na personalização e customização dos processos de produção. Conseqüentemente esta tendência leva a produtos com baixo ciclo de vida, baixo volume e rentabilidade, sendo a velocidade de inserção de novos modelos ou produtos um diferencial para geração de valor agregado [12].

O processo de conformação de chapas convencional requer componentes específicos e com custo elevado de ferramental, a manufatura adiciona maior tempo no primeiro ciclo de produção, devido a fabricação da ferramenta, ou piora o *lead-time*. Estampagem incremental é uma das tecnologias emergentes como uma alternativa aos processos convencionais para processos que necessitam de customização. É considerado um processo para conformação de peças tridimensionais altamente complexas usando ferramental relativamente simples.

Chamando a atenção do mercado da indústria devido ao seu alto poder de flexibilidade e baixo custo [13].

O processo de estampagem generaliza diversos tipos de manufatura realizada em chapas de metal, onde operações como dobras e furos sempre alterarão a forma geométrica da chapa. As deformações sempre são realizadas no estado sólido, onde o material é deformado em regime plástico. Como vantagens da estampagem pode-se citar, um grande aproveitamento da matéria-prima, com redução substancial de desperdícios e sobras de material, quando comparado, por exemplo, a Usinagem. E ainda, pode-se citar como vantagens da ISF a flexibilidade do processo, o incremento da característica de conformabilidade, a dispensa do uso de ferramentas especializadas, uso de máquinas CNC convencionais, possibilidade de estampagem de peças de dimensões variadas, o acabamento superficial pode ser melhorado com o uso de lubrificantes, operação livre de ruídos intensos, o processo proporciona a manufatura de uma variedade de formas irregulares e assimétricas, como por exemplo produtos médicos altamente customizados [1][2][14][15][16][17].

Atualmente, os processos de estampagem se diversificam em suas formas de trabalho e aplicação, porém, todos ainda mantêm o intuito de sua concepção original que é deformar a chapa tornando-a um produto com dimensões e formas geométricas precisas conforme projeto estipulado. Para cada processo de estampagem tem-se particularidades nas suas características e procedimentos para estampar [3][18].

## **2.1. Estampagem Incremental**

A ISF é um processo de conformação mecânica que utiliza ferramentas genéricas de baixo custo e que possibilita a manufatura de peças de chapa de diversas geometrias. Para realizar a ISF, pode-se utilizar equipamentos CNC específicos ou adaptando máquinas-ferramenta de usinagem. O processo de ISF foi descrito e patenteado por Leszak (1960) e Roux (1967) quando a tecnologia CNC ainda era incipiente. E a partir dos anos 1990, foi onde teve um crescimento substancial [2][18].

Este processo tem demonstrado um grande potencial formando complexas peças tridimensionais sem a utilização de ferramentas específicas quando comparado a estampagem convencional.

Pode-se observar na Figura 2, que em ISF, o *blank*<sup>2</sup>[19], chapa a ser conformada, é presa em um suporte regulável móvel, independente do formato final da chapa, que pode efetuar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralelamente ao eixo Z, e nas direções horizontais de X e Y. Enquanto a estampagem estiver ocorrendo, elementos de fixação distribuídos em torno da chapa evitam que a mesma se movimente, criando assim uma deformação plástica na chapa. Acoplada ao *spindle* (eixo árvore) de um dispositivo CNC, uma ferramenta de cabeça semiesférica dá início ao processo de ISF por meio do movimento contínuo sobre a superfície da chapa e gradativamente ocorrendo a conformação por meio de incrementos verticais negativos [3][20].

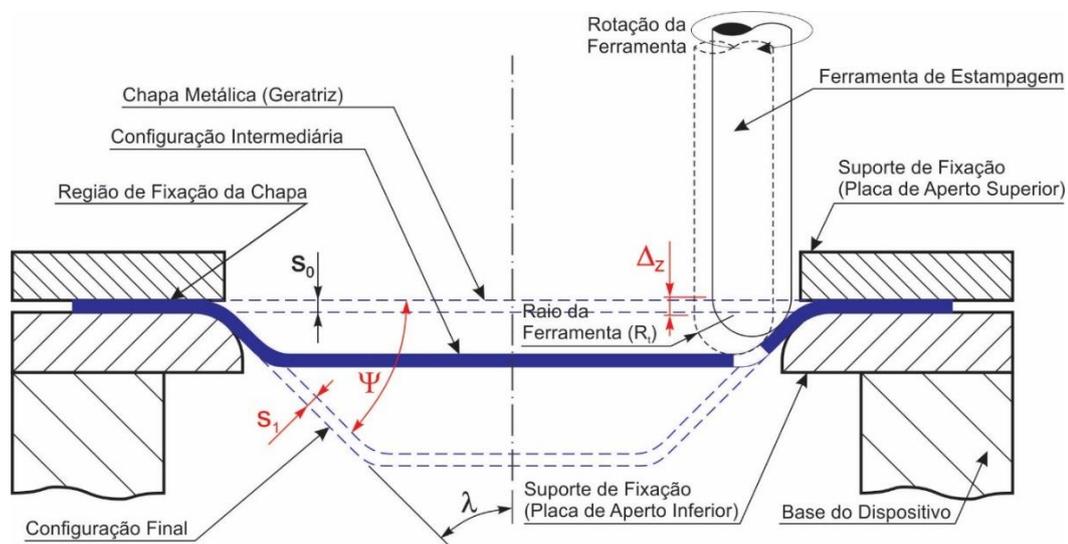


Figura 2 – Processo de Estampagem de Ponto Simples (SPIF). Adaptado de [21].

O processo de conformação de chapas metálicas para produção de protótipos ou peças em pequenos lotes torna-se menos favorável que a ISF devido a necessidade de produção de um molde, gerando maiores custos de produção. Recentemente diferentes cinemáticas baseadas em processos de conformação de chapas metálicas vem sendo utilizadas, destacando-se a ISF de chapas. Neste contexto, a ISF está sendo desenvolvido utilizando máquinas inicialmente projetadas para outras operações: a) Robôs com tecnologia *Roboforming*, ISF robótica; [22] b) Centro de Usinagem, projetados para usinagem e adaptados para estampagem. [2][14][23] c) Máquinas dedicadas para ISF, para produção industrial em pequena escala e prototipagem rápida [24].

O processo de ISF pode ser dividido essencialmente em duas famílias, dependendo do número de pontos de contato entre ferramenta, chapa e matriz (quando presente). Por isso, é

<sup>2</sup> Peça de metal laminado de onde devem ser recortadas peças. Peça de metal que foi preparado para ser cunhado ou amoadado [19].

possível distinguir à ISF de ponto simples (*Single-point Incremental Forming – SPIF*(Figura 3a)), e de ponto duplo (*Two Points Incremental Forming – TPIF*(Figura 3b)) [3][25].

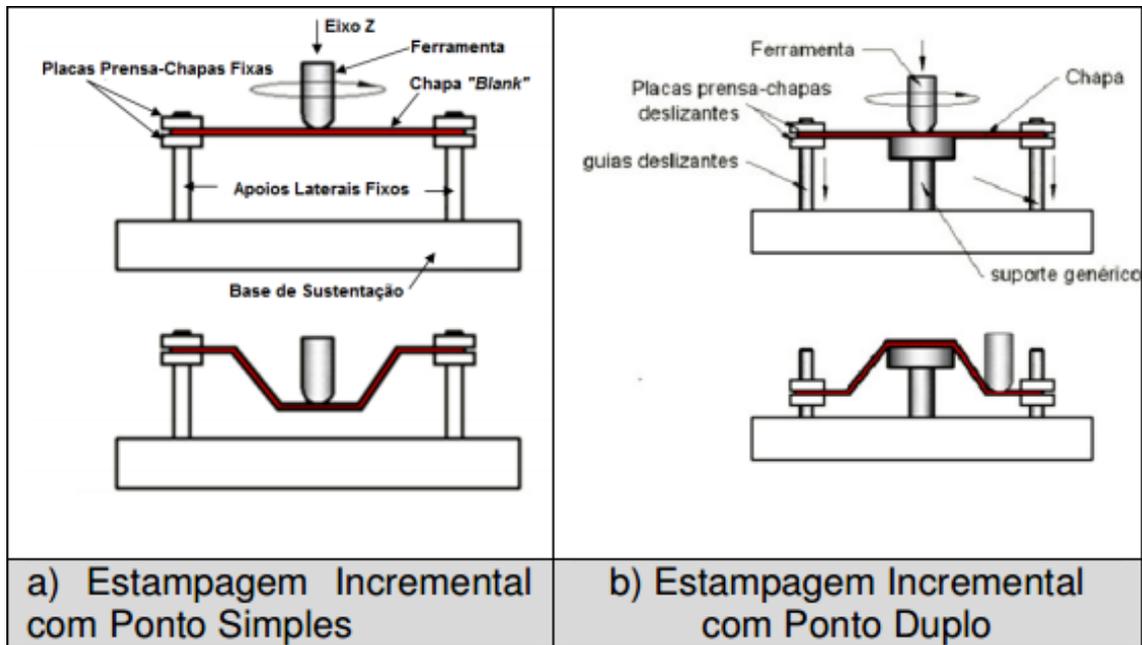


Figura 3 – Representação Gráfica dos Processos de SPIF (a) e TPIF (b). Adaptado de [3].

Allwood et al. (2005) desenvolveu e construiu uma máquina dedicada para ISF na Universidade de Cambridge, o seu esboço está sendo demonstrado na Figura 4. Foi desenvolvido um sistema simples de montagem e desmontagem de ferramentas, e ainda possuindo acessórios com células de carga usado para instrumentação e controle do processo.

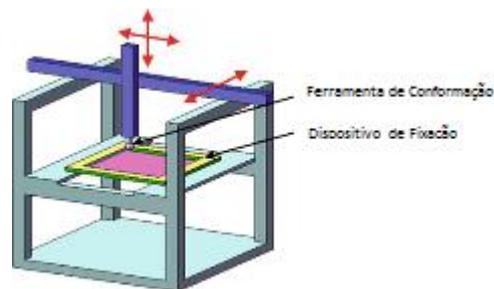


Figura 4 – Desenho de máquina dedicada de ISF desenvolvida por Allwood et al (2005).

Uma outra máquina pode ser observada na Figura 5. Esta foi desenvolvida pela empresa Japonesa *Amino Corporation* sendo produzida comercialmente. Para este caso os movimentos em duas direções são fornecidos pela ferramenta, enquanto que o quarto movimento é fornecido pelo suporte da mesma.

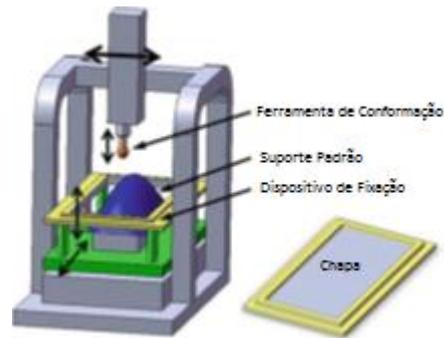


Figura 5 – Máquina comercial da empresa Amino Corporation [24].

Recentemente, uma variante da TPIF, chamada de DSIF (*Double-Sided Incremental Forming* - ISF de lado duplo), neste processo a matriz possui também uma ferramenta de conformação controlada de forma independente proporcionando uma maior flexibilidade ao processo. Na Figura 6 pode-se observar a operação do processo [26].

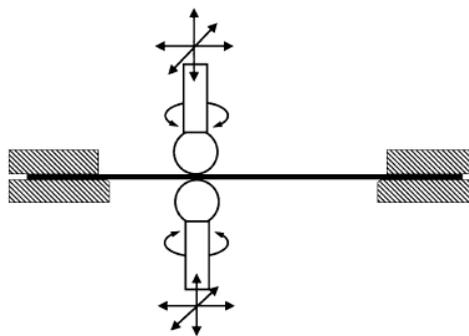


Figura 6 – Double-sided incremental forming (DSIF) [26].

Alguns pesquisadores fizeram mudanças e adaptações nos processos de ISF, por exemplo, [27] usaram um punção móvel. A proposta dos mesmos consiste em um punção móvel em quatro ferramentas cilíndricas de apoio possuindo pontas semiesféricas arranjados em uma grade. Já no trabalho de [22] os pesquisadores utilizaram dois robôs controlando duas ferramentas independentes chamando o processo de DPIF (*Duplex Incremental Forming* - ISF dupla). Eles usaram o controle de posicionamento da ferramenta de deformação combinado com a força e controle da ferramenta de suporte permanecendo em contato contínuo. Pode-se observar o processo na Figura 7.

Os diversos trabalhos na área de ISF permitiram que [28] pudesse prover algumas observações e orientações acerca do processo. Como:

- A capacidade de conformação aumenta com a diminuição do tamanho da ferramenta, bem como com a diminuição do incremento vertical ( $\Delta z$ );

- A anisotropia tem influência na conformação do material, com ferramentas de menor diâmetro se consegue maior maleabilidade;

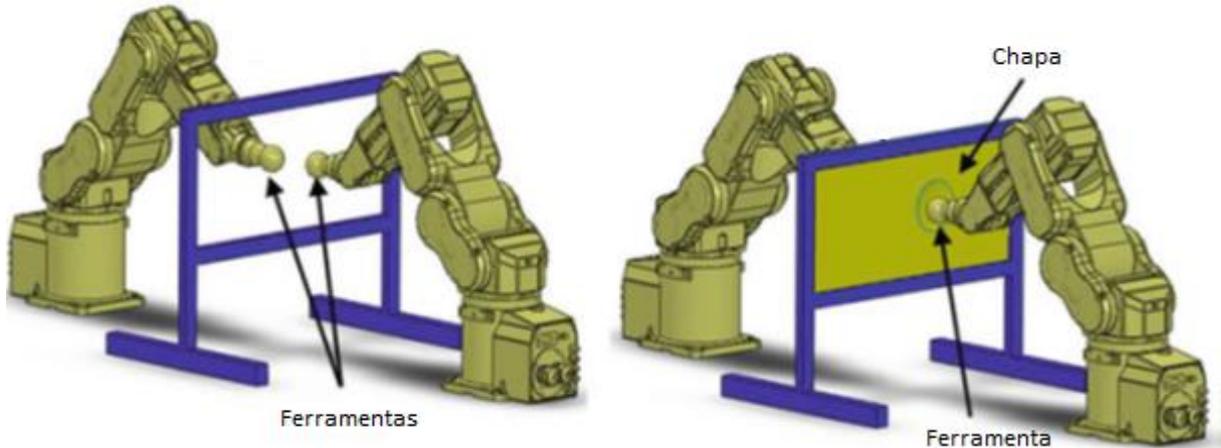


Figura 7 – ISF dupla - Duplex incremental forming (DPIF) [22].

- Capacidade de conformação diminui com a espessura da chapa;
- Grande incrementos verticais aumentam a rugosidade;
- Aumento de incremento vertical e diâmetro da ferramenta, aumentam as forças de deformação;
- Há uma limitação máxima de ângulo de parede em uma só passagem, desta maneira, para conformações com grandes ângulos de parede são necessários vários passos;
- O caminho da ferramenta em espiral é preferível ao de contorno;
- A lubrificação é essencial para que a ferramenta deslize e distribua a pressão de toque sobre a chapa, preservando a integridade de ambas.

As características técnicas da ISF conferem flexibilidade ao processo, tornando-se ideal para produção de protótipos, peças únicas ou pequenos lotes, e com características específicas, e desta maneira, o processo torna-se viável financeiramente. Para isto, é necessária uma melhor compreensão da mecânica do processo e dos parâmetros que o influenciam [12][29].

Diversos artigos relatam que os quatro principais parâmetros que influenciam no processo de ISF são: o diâmetro da ferramenta de estampagem ( $R_T$ ), o incremento vertical ( $\Delta z$ ), o ângulo de parede ( $\Psi$ ) e a espessura da chapa de metal ( $s_0$ ) [30][31][32][33].

As forças necessárias para a conformação têm grandes impactos nas ferramentas e acessórios utilizados no processo ISF, além de influenciar no maquinário necessário. Ser capaz

de prever a magnitude das forças entre a ferramenta e a peça é de suma importância para o desenvolvimento de modelos de processos para ISF [30].

## 2.2. Extensometria

A instrumentação e controle devem ser alternativas como processos de medição, aferição e testes em processos industriais. Sendo uma das áreas da instrumentação a Extensometria, que se trata de uma técnica para a análise experimental de tensões e deformações em estrutura mecânicas ou de alvenaria [34].

Os projetos e análises estruturais utilizam métodos de cálculo que avaliam a resistência do material comparada a carregamentos aplicados. Estes carregamentos muitas vezes são estimados. Sendo assim, falhas por sobrecarga ou desgaste durante a vida podem ocorrer nas peças, devido a uma má avaliação das forças existentes e, por consequência, a errônea determinação de parâmetros de projeto [34].

O competitivo mercado da indústria atual exige que projetos reduzam seus custos primando pela qualidade. Assim, surgiu a necessidade de uma avaliação mais elaborada das reais condições de carregamento a que a peça será submetida [35].

As avaliações dos esforços baseiam-se nas descobertas de Robert Hooke (1678), que relacionam os esforços aplicados por meio da tensão gerada no material  $\sigma$ , com a deformação resultante  $\epsilon$ , pela Lei de Hooke ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ), sendo E o módulo de elasticidade [36].

Diversos procedimentos e equipamentos foram criados com o intuito de medir deformações. Os primeiros aparelhos eram essencialmente mecânicos, apresentando limitações e erros de medição. Com a evolução da eletroeletrônica, *Wheatstone* (1843) constatou que os efeitos da variação da resistência de um condutor elétrico causada pela aplicação de uma tensão mecânica poderiam ser utilizados para este fim. E em 1856 William Thomson conseguiu medir esse feito [36].

Simons e Ruge desenvolveram os primeiros protótipos de extensômetros. Desde então, extensômetros vem sendo usados e tem contribuído muito nos avanços dos estudos nos campos de metrologia, análise de tensões e projeto mecânico. Estes medidores de deformação relativa elétricos são dispositivos que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usualmente utilizados por engenheiros de instrumentação [37].

Apesar de existirem diversos métodos de inspeção não destrutivos, a extensometria têm sido muito utilizadas devido a sua ampla aplicabilidade. [34]. Pode-se citar algumas características das medidas com extensômetros como:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes repostas aos fenômenos dinâmicos;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que usados os tratamentos adequados;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos;
- A saída (sinal analógico, ou após a transformação em sinal digital) pode ser aplicada à engenharia de controle.

Os extensômetros, que são dispositivos que medem deformação relativa a partir de uma tensão gerada no material, são usados para medir deformações lineares em diferentes estruturas. A partir da colagem de um Extensômetro em uma estrutura, converte-se a deformação relativa em uma quantidade elétrica (voltagem). A extensometria permite que sejam efetuadas diversas medições em uma estrutura, sem que esta seja destruída. Desta maneira, permite-se a uma análise quantitativa da deformação sob condições reais de operação. Sendo assim, os extensômetros proveem um método excelente para converter deformações em quantidade elétrica [38] [39] [40].

### **2.2.1. Extensômetros**

A partir de uma força, aplicada a um determinado material, é possível efetuar a medição da deformação na região elástica. Este material sendo tracionado ou comprimido, mantém-se uma relação constante entre magnitude de força e a quantidade de deformação. A partir da força externamente gerada o material contrabalança internamente, e a magnitude por força por unidade de área é chamada de tensão ( $\sigma$ ). A tensão é um vetor, tendo uma magnitude e uma direção sendo expressa por uma relação de força por unidade de área [37] [41].

De certa forma, um material quando tracionado alonga, e quando comprimido o mesmo contrai. Suponha-se que um material é tracionado, sendo a quantidade desse alongamento dado por  $\Delta l$ , enquanto que o comprimento inicial seja  $l_0$ . A relação desse alongamento, Equação 1, é chamada deformação relativa, não apresentando dimensão [36].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (Eq 1)$$

A partir da Figura 8 observa-se a relação entre tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\varepsilon$ ) de um corpo de prova de aço doce submetido a um carregamento de tração. Há uma proporcionalidade entre a tensão à deformação da origem ao ponto a. Região elástica onde se aplicam as leis de Hooke, que pode ser observada na Equação 2 [36].

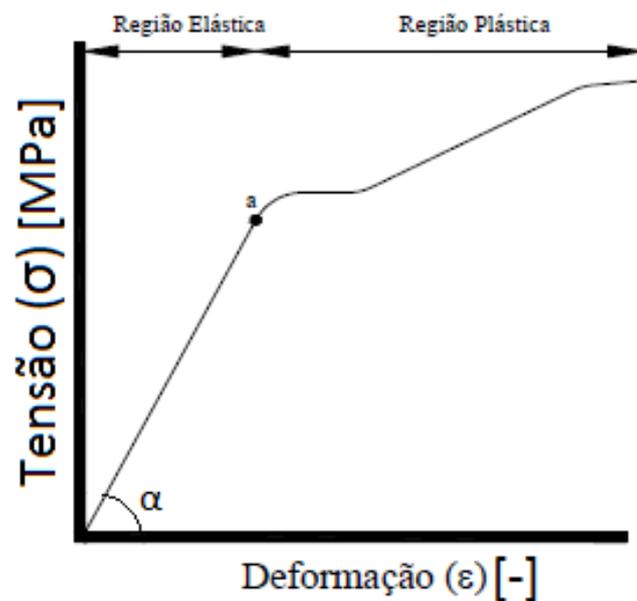


Figura 8 – Curva tensão-deformação [1].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (Eq 2)$$

Onde:

$E$ : é uma constante de proporcionalidade, módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.

O extensômetro de resistência elétrica é constituído que os materiais mudam sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação. Na Figura 9 pode-se observar parte de um fio metálico. Onde este fio antes da deformação apresenta uma resistência elétrica  $R$ , com comprimento original  $l$ .

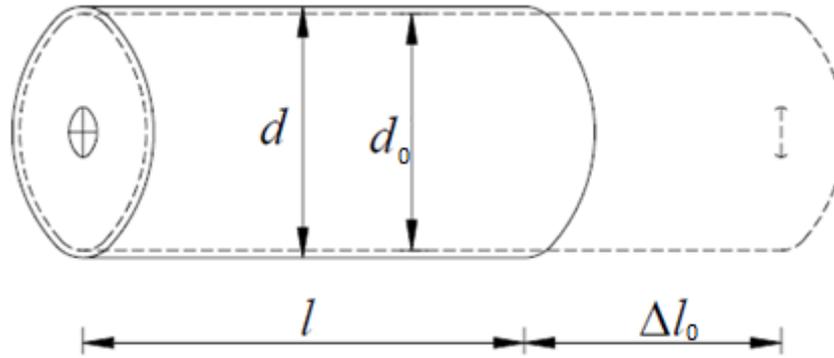


Figura 9 – Deformação de um fio sobre tração [36].

A linha pontilhada da Figura 9 apresenta este mesmo fio com alongamento, seu comprimento então passa a ser  $l + \Delta l$  e resistência elétrica de  $R + \Delta R$ . Sendo essa resistência elétrica  $R$  dada pela Equação 3:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{a} \quad (Eq\ 3)$$

Onde:

- $a$ : área da seção transversal do fio;
- $\rho$ : resistividade do material do fio;
- $l$ : comprimento.

A obtenção de uma mudança relativa na resistência só é possível se todos os membros da Equação 3 forem diferenciados. Tirando-se o logaritmo e fazendo a derivada por meio da Equação 4 tem-se a Equação 5.

$$\ln R = \ln \left( \rho \cdot \frac{l}{a} \right) \therefore \ln R = \ln \rho + \ln l - \ln a \quad (Eq\ 4)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} \quad (Eq\ 5)$$

Onde a área da seção transversal de um círculo ( $a$ ) como mostrado na Figura 9 será dada pela Equação (6):

$$a = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (Eq\ 6)$$

Para extensômetros de lâmina (*foil*) (Figura 10), que apresentam seção retangular, a expressão usada para este tipo de área será a apresentada na Equação (7):

$$a = b \times t \quad (\text{Eq } 7)$$

Onde:

- $b$ : largura da seção retangular;
- $t$ : espessura da lâmina.

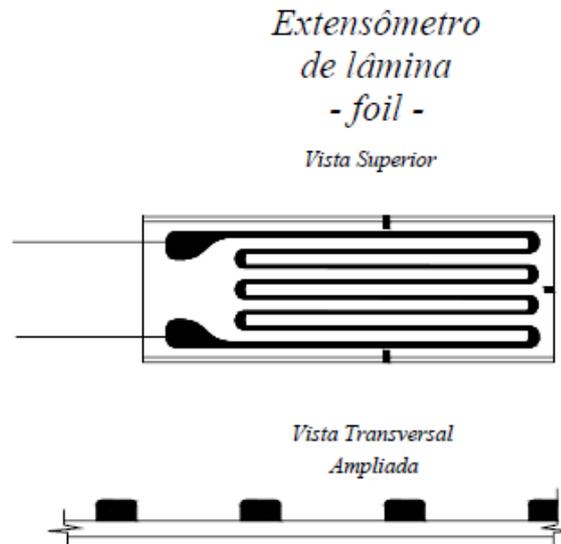


Figura 10 – Extensômetros de lâmina [36].

Alongando-se o comprimento do fio  $l$  por uma tensão de tração para  $l_1$ , e comprimindo o diâmetro original  $d_0$ , para  $d_1$ , tem-se o efeito dado pelo coeficiente de Poisson, então na Equação 8:

$$\ln a = \ln \left( \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \therefore \ln a = \ln \frac{\pi}{4} + \ln d^2 \therefore \ln a = \ln \frac{\pi}{4} + 2 \cdot \ln d \quad (\text{Eq } 8)$$

Tirando a derivada da Equação 8, tem-se a Equação 9:

$$\frac{\Delta a}{a} = 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = 2 \cdot \frac{d' - d}{d} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Eq } 9)$$

O mesmo pode ser feito para a seção retangular do extensômetro, chegando a Equação 10:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t}{t} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Eq } 10)$$

Onde,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. Dessa forma, substituindo a Equação 9 ou a Equação 10 na Equação 5, tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} = (2 \cdot \nu + 1) \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (11)$$

Onde,  $\Delta l/l$  não é nada mais que a deformação,  $\varepsilon$ , e finalmente pode-se escrever a Equação 11 da seguinte forma:

$$\left( \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) = (2 \cdot \nu + 1) + \left( \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \right) \quad (Eq 12)$$

A mudança da resistividade elétrica,  $\rho$ , ocorre proporcionalmente com a mudança volumétrica do material, de modo que:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (Eq 13)$$

Onde  $m$  é uma constante de proporcionalidade. E que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta l}{l} + \left( -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) = (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \varepsilon \quad (Eq 14)$$

Substituindo a Equação 14 na 13 e em seguida na Equação (12), tem-se:

$$\left( \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) = (2 \cdot \nu + 1) + [m(1 - 2 \cdot \nu)] = (1 + m) + 2\nu(1 - m) \quad (Eq 15)$$

Para a Equação 13,  $m$  é uma constante de proporcionalidade determinada a partir da experimentação do material. Os extensômetros, em sua maioria, possuem materiais resistivos a base de ligas de cobre e níquel, sendo  $m$  igual à unidade de dois, sendo a parte direita da Equação 15 aproximadamente igual a 2 (dois). Os fabricantes de extensômetros proveem esta constate nas características técnicas do dispositivo, geralmente expressa pelo símbolo  $K$ , conhecido como Sensibilidade à Deformação Relativa. Desta maneira, tem-se a Equação 16:

$$\frac{\left( \frac{\Delta R}{R} \right)}{\varepsilon} \cong 2 \quad (Eq 16)$$

Uma vez que o valor de  $K$  é determinado dependendo do material resistivo usado para o construção do extensômetro, a Equação 16 pode ser mudada para a Equação 17:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (Eq 17)$$

Sendo assim, a magnitude da deformação relativa medida pelo extensômetro é proporcional a resistência gerada por ele. Sendo desejável então que o material resistivo do extensômetro possua um valor de  $K$  sem correlação com a magnitude da deformação. O valor de  $K$  para semicondutores simples de cristais usados como elementos sensores de deformação, exibe uma resistividade variável com a magnitude da tensão imposta a ele, conforme Equação 18:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi l \cdot \sigma \quad (\text{Eq 18})$$

Onde  $\pi$  é chamado coeficiente piezo-resistivo, o qual apresenta valores diferentes dependendo da direção dos eixos dos cristais. O elemento sensor de deformação de um extensômetro é disposto formando uma grade de material em uma pequena área fornecendo uma dada resistência, usualmente  $120\Omega$  ou  $350\Omega$ . A sensibilidade à deformação  $K$  corresponde ao fator do extensômetro,  $K_s$ , o qual correlaciona a deformação relativa no membro ensaiado, com a mudança na resistência relativa no medidor.

### 2.2.1.1. Confeção dos Extensômetros

Na Figura 11 pode-se observar um típico extensômetro. O mesmo é composto por uma lâmina resistiva fixada em um material base. Além de possuir fios de saída para soldagem e prover leituras dos sinais apresentados. Usualmente são feitos para ter uma resistência de  $120\Omega$ , mas existem dispositivos disponíveis com resistência de  $350\Omega$ ,  $500\Omega$  e  $1000\Omega$  [42] [43].

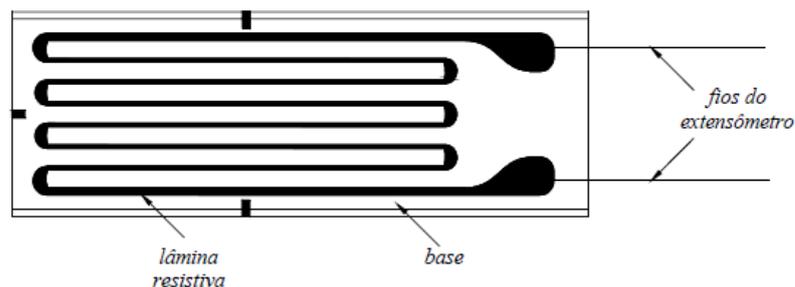


Figura 11 – Esquema de construção de extensômetro [36].

Os extensômetros, devido a sua sensibilidade podem sofrer deformações devido a alteração de temperatura. Algumas técnicas estão disponíveis para diminuir o efeito da temperatura. Os dispositivos disponíveis no mercado atualmente são construídos destinados a diferentes materiais, dessa forma, são construídos para diminuir os efeitos da temperatura [36] [44]. Esses extensômetros são chamados de SELCOM<sup>®</sup>, que é uma junção das iniciativas em

inglês para “*self compensation*”, que significa auto-compensação. Sua aparência e construção são idênticas as dos extensômetros comuns.

Poder-se-ia sugerir que as deformações devido a temperatura seriam muito pequenas e deveriam ser ignoradas. Mas, tanto o coeficiente de dilatação térmica do aço em torno de  $\alpha = 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , o que significa que para cada grau Celsius variado no ambiente de Ensaio, a deformação devido à temperatura será de  $10\mu\epsilon$ . Para alguns procedimentos em ambientes climatizados tal variação pode ser desprezível, porém em outros casos onde a deformação devido à flexão ou tração não sejam tão grandes, esta variação pode falsear os resultados.

### 2.2.1.2. Tipos de Extensômetros

Diversos tipos de extensômetros, [36,42,45–50], estão disponíveis no mercado, dependendo dos propósitos de aplicação, tamanho e materiais, eles são classificados normalmente de acordo com:

- O material resistivo: Fios resistivos; Lâmina; Semicondutor; Semicondutor por difusão.
- O material base: Papel; Baquelita; Poliéster; Poliamida; Outros (finalidades especiais).
- A sua configuração: Uniaxiais; Biaxiais; Multiaxiais (roseta); Padronização especial.

Existem muitas condições a serem consideradas para a comparação das características dos extensômetros, porém, usualmente os de lâmina são superiores aos de fios resistivos.

- **Extensômetro de Lâmina para Uso Geral**

Usualmente construídos a partir de ligas de cobre e níquel, em bases plásticas onde são gravados as configurações desejadas. Os mais usuais disponíveis são de base de poliamida e de resina epóxi-fenólica (*phester*).

- Base de resina epóxi-fenólico (*phester*)
  - Uma resina especial obtida pela modificação do fenol em epóxi é usada em sua base, assim este extensômetro é fino, flexível e fácil de colar. Apresenta pouca variação do sinal de saída ao longo do tempo. Pode ser

chamado de extensômetro universal por estas vantagens. Combinados com adesivos de utilização em temperatura ambiente exibem excelentes características de funcionalidade e tem aplicação em campo muito satisfatória. Também são utilizados na fabricação de transdutores. A faixa de temperatura de operação vai de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Base de poliamida
  - Como usam resinas de poliamida de excelente resistência ao calor em sua base, este extensômetro tem utilização em temperaturas de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , utilizando as colas adequadas. São apropriados para medidas em Ensaio de longa duração. Existem ainda extensômetros construídos com o elemento resistivo entre duas camadas de resina de poliamida, formando um sanduíche. Este tipo de extensômetro é de construção mais robusta, porém fácil de manusear.

- **Extensômetros de Fios Resistivos**

São compostos por um fino fio resistivo, colados em base de papel ou plástico em forma de grade. Estes também são classificados de acordo com o material de base, que pode ser: papel, poliéster e resina epóxi-fenólico (*phester*).

- Base de resina epóxi-fenólico (*phester*)
  - Os extensômetros de fios com base de resina epóxi-fenólico usam o mesmo material de base de extensômetros de lâmina deste tipo. Podem ser usados tanto adesivos de colagem em temperatura ambiente como adesivos de alta temperatura de colagem. O extensômetro é superior em características como manutenção do sinal de saída ao longo do tempo, resistência ao calor, umidade e colagem, mostrando-se adequados para todo tipo de aplicação. extensômetros de grandes comprimentos são usados principalmente para aplicações de concreto. A faixa de temperatura de operação é de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$
  
- Base de Papel
  - Papéis especialmente são usados como base, e colas de secagem rápida devem ser usadas com este tipo de extensômetro para tornar o trabalho mais fácil. Assim, este extensômetro é usado para aplicações comuns de

medidas de tensão. Entretanto, esses não são adequados para uso em Ensaaios prolongados ou para medições em campo devido a sua alta capacidade de absorção da umidade. A oxidação ocorrerá nos fios resistivos dos extensômetros quando armazenados por um longo período de tempo. Estes tipos de extensômetros devem ser usados dentro de seis meses de sua fabricação, dependendo do fabricante. A faixa de temperatura de operação vai de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Base de Poliéster
  - Usando resina de poliéster em sua base, este extensômetro pode ser colado em temperatura ambiente usando adesivo de poliéster. A faixa de temperatura de operação vai de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+170\text{ }^{\circ}\text{C}$  o que faz este tipo de extensômetro popular em aplicações de medições em campo.

### **2.2.2. Escolha e Especificações dos Extensômetros**

Alguns cuidados devem ser tomados na escolha correta do extensômetro já que uma grande variedade de diferentes especificações. Essa escolha deve-se basear principalmente de acordo com as condições de medição, material a ser medido e para qual propósito será medido. A escolha imprópria resultará em uma não efetiva aquisição das medidas. Para a correta escolha dos extensômetro é necessário atentar para algumas características, tais como:

- Faixa de temperatura à que o extensômetro estará submetido;
- Limite máximo de alongamento do próprio extensômetro;
- Corrente (amperagem) máxima suportada pelo extensômetro;
- Resistência à umidade;
- Durabilidade necessária.

Para se efetuar medições estáticas o extensômetro deve ser escolhido associativamente ao material que vai ser ensaiado. Com medições dinâmicas o extensômetro deve apresentar característica de resistência à fadiga, devido ao número repetitivo das variações das grandezas. O alongamento comumente encontrado extensômetro é no máximo 2%, porém existe dispositivos disponíveis que podem apresentar limites maiores, que devem ser usados em casos especiais [36] [37] [51].

Os fabricantes de extensômetros apresentam cada um a sua maneira de codificar as características importantes dos mesmos de modo a facilitar suas identificações. Na Figura 12 demonstramos esquema de identificação utilizado pela Excel Sensores, na Figura 13 podemos observar o esquema da *Micro Measurements* e em seguida na Figura 14, demonstramos da KYOWA.

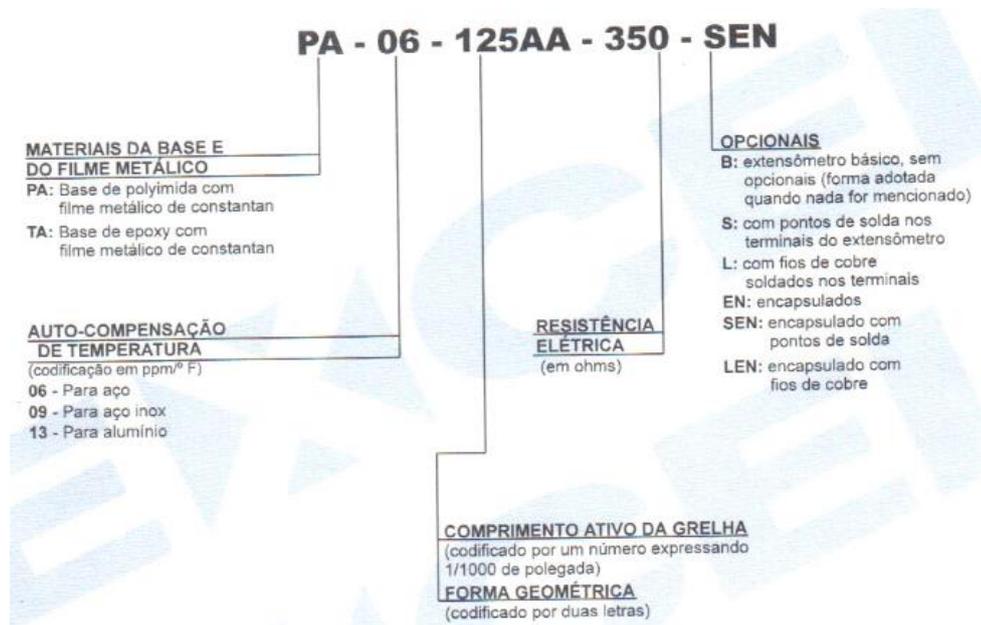


Figura 12 – Esquema de identificação da Excel Sensores.

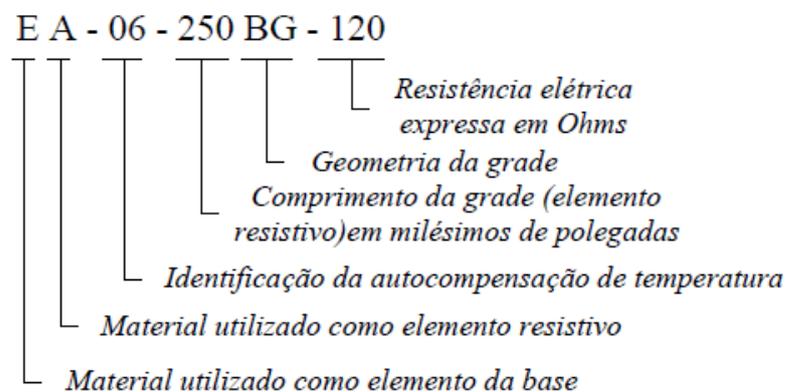
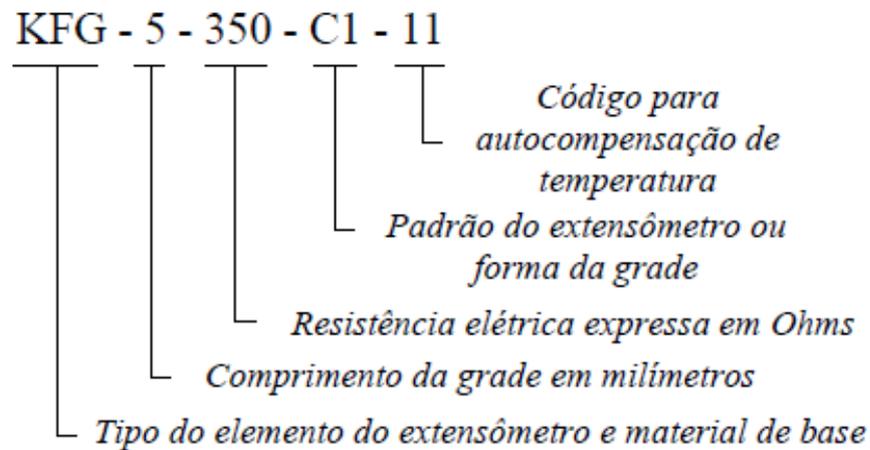


Figura 13 – Esquema de identificação utilizado pela MicroMeasurements.



*Figura 14 – Esquema de identificação da KYOWA.*

### 2.2.3. Colas e Procedimentos de colagem

Normalmente os fabricantes comercializam colas para diferentes aplicações, sendo efetuados estudos para que o instrumentista consiga aproveitar vantagens, algumas por exemplo, são ativadas termicamente, enquanto outra podem ser usadas em temperatura ambiente. Os tipos de cola variam com suas características, tais como: pressão de colagem, condições para cura, faixa de temperatura de operação e condições de estocagem.

Para colar um extensômetro em um corpo de prova, a cola é aplicada na parte de trás da base do extensômetro e na área de colagem do próprio corpo de prova, e então o extensômetro é colocado na posição requerida e permitido o endurecimento da cola com uma pressão aplicada sobre o conjunto. Algumas colas apresentam cura de forma instantânea que em quase todos os casos uma mera pressão no extensômetro com a ponta dos dedos é suficiente para completar o trabalho de colagem.

A checagem do funcionamento de um extensômetro e se sua colagem foi executada de maneira correta é consideravelmente difícil. Existem alguns métodos práticos e qualitativos que podem ser sugeridos para verificação se a colagem e cura foi realizada de maneira adequada. Um dos métodos disponíveis é em cortar parte da base do extensômetro que está colado com uma ferramenta de corte, e ao retirá-la verificar se está descascando a superfície do corpo de prova facilmente, ocorrendo isso, a colagem não está de maneira adequada. Este procedimento é possível de fazer apenas na parte da base do extensômetro, tomando-se o devido cuidado com a parte metálica [36].

Outra alternativa de verificação está em utilizar uma placa de borracha e posicionando-a em cima do extensômetro com leve pressão, verificar se a leitura após a variação da pressão não retornar a leitura inicial é um sinal de que pode conter bolhas de ar entre o extensômetro e o corpo de prova. Esta alternativa é mais simples de ser executada quando comparada a primeira [36].

### 2.3. Sistemas de Medição de Extensômetros

As deformações que ocorrem na ferramenta são medidas pelo extensômetro e seu sistema de medição, porém as leituras não saem em forma de gráficos, tabelas ou relatórios. É necessária a utilização de um conjunto de aparelhos de transformação para que a deformação sentida pelo extensômetro demonstre informações concretas. Além disso, essas deformações medidas são normalmente pequenas, produzindo variações no sinal elétrico nas mesmas proporções, não podendo ser lidas diretamente por um osciloscópio ou um multímetro. Esse processo da verificação do fenômeno da deformação até a informação dos dados legíveis é feito por um sistema de medição [43] [52].

Os sistemas de medição são ferramentas capazes de quantificar fenômenos da natureza. Existem sistemas de avaliação da temperatura, de esforços, escoamento de fluídos, composições químicas, entre outros [41][51][53].

Na análise de tensões por extensometria, o sistema de medição é formado basicamente de sensores de deformação ou extensômetro de resistência variável, que converte deformação mecânica em variação da resistência elétrica. Circuitos especiais são empregados para medidas de deformação com extensômetros montados em corpos de prova. O circuito é geralmente chamado de ponte de *Wheatstone* (Figura 15). Este é o circuito mais frequentemente usado e que apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência [46][47][48][54].

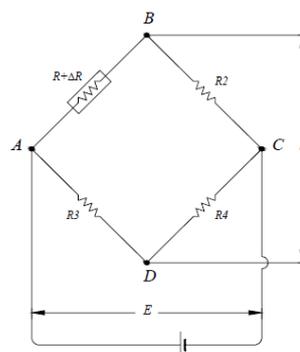


Figura 15 – Circuito em ponte de *Wheatstone*.

Resistores elétricos em série são divisores de tensão (voltagem) e que a tensão entre os resistores em paralelo não varia, para resistores em paralelo a corrente é quem varia. Para dois resistores em série com uma tensão de alimentação aplicada  $e_{AD}$ , Figura 16, a tensão entre o ponto  $A$  e  $D$  apresenta valor dado pela Equação 19:

$$e_{AD} = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \cdot E \quad (\text{Eq 19})$$

Para o circuito A e B Figura 16 a tensão é chamada de  $e_{AB}$ , e apresenta valor igual a Equação 20:

$$e_{AB} = \left[ \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] \cdot E \quad (\text{Eq 20})$$

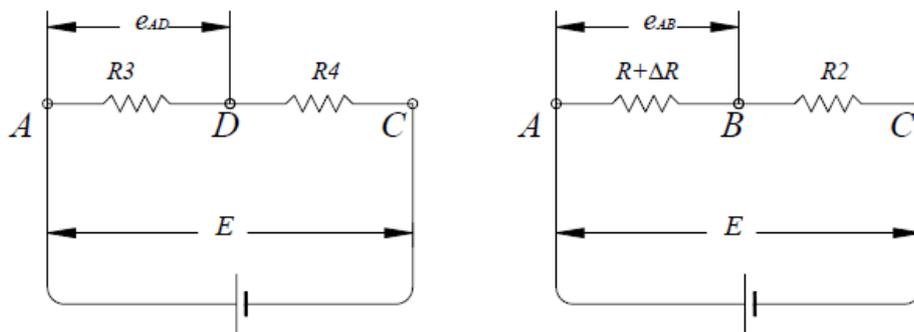


Figura 16 – Circuito de resistores em série.

Tendo os circuitos da Figura 16 em paralelo, tem-se a ponte de *Wheatstone*, demonstrado na Figura 15, onde a diferença de potencial entre os pontos  $D$  e  $B$  será a diferença entre  $e_{AD}$  e  $e_{AB}$ , que nada mais é que o valor de  $e$  que se pretende medir. Supondo agora que na Figura 15,  $R$  é a resistência do extensômetro e  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  são resistores fixos e uma voltagem elétrica,  $E$ , é aplicada no circuito da ponte, e supondo ainda que o extensômetro sofra uma deformação relativa e a resistência mude para  $R + \Delta R$ , então existirá uma voltagem elétrica,  $e$ , gerada nos terminais de saída da ponte, conforme Equação 21:

$$e = e_{AD} - e_{AB} = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] \cdot E \quad (\text{Eq 21})$$

Se  $R = R_2 = R_3 = R_4$ , a Equação (21) pode ser escrita como a Equação 22:

$$e = \left[ \frac{+\Delta R}{2 \cdot (2R + \Delta R)} \right] \cdot E \quad (\text{Eq 22})$$

Uma vez que  $2R \gg \Delta R \therefore 2R + \Delta R \cong 2R$ , e assim tem-se a Equação 23:

$$e = + \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{Eq 23})$$

A partir disso, percebe-se que a voltagem na saída da ponte,  $e$ , é proporcional à variação relativa na resistência do extensômetro. Portanto, substituindo a Equação 23 na Equação 17, tem-se a Equação (24):

$$e \cong \pm \frac{E}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \quad (\text{Eq 24})$$

Assim fica claro que  $e$  é proporcional à deformação,  $\varepsilon$ . Portanto para se determinar o valor da deformação relativa, é necessário apenas medir a voltagem de saída da ponte. Pode-se comparar a ponte de *Wheatstone* com uma ponte hidráulica, ambas demonstradas na Figura 17.

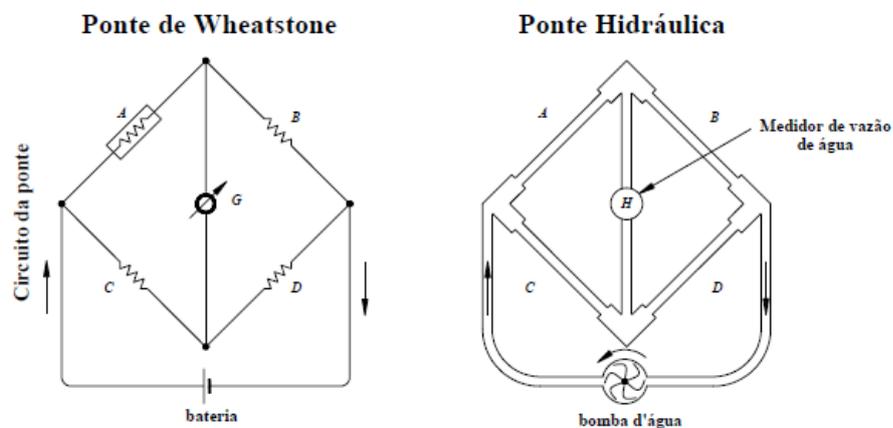


Figura 17 – Esquema de pontes de *Wheatstone* e Hidráulica [36].

Na ponte de *Wheatstone*, a condição para que o galvanômetro apresente deflexão zero, condição de trabalho de equilíbrio, é que  $AxD = BxC$ . Se  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  apresentarem resistências iguais, não existirá corrente passando por meio do galvanômetro,  $G$ , mas qualquer pequena mudança na resistência de  $A$  fará com que o galvanômetro sofra uma deflexão. Na ponte hidráulica, se a resistência dos tubos,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  forem iguais, o medidor de vazão de água não mostrará nenhum movimento, mas qualquer aumento ou diminuição no diâmetro, ou seja, na resistência de  $A$  fará com que o medidor de vazão de água  $H$ , se mova.

Diversos fabricantes possuem sistemas de aquisição de dados, ou DAQ (*Data Acquisition System*), que efetuam o processo de amostragem de sinais que medem condições físicas reais e convertendo as amostras resultantes em valores numéricos digitais que podem ser manipulados por sistemas computacionais. Estes DAQ atuam como uma interface entre um sistema computacional e sinais de um mundo exterior. Pode-se citar alguns fabricantes de DAQ como *NI - National Instruments*, *HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik*, além de empresas que desenvolvem software para tratamento de emulação de hardware como o *LabView* da *National Instruments* e o *Matlab* da *MathWorks*, entre outros [36][37].

### 2.3.1. Técnicas de Medição

Em um circuito de ponte de *Wheatstone* sempre haverá quatro braços em sua configuração, porém, no processo de medição existem três diferentes tipos de disposição de extensômetros no circuito de ponte, e a nomenclatura para estes tipos de disposição muitas vezes pode levar o usuário menos experiente a ter a falsa ideia de conjunto do circuito, pois suas nomenclaturas usuais são: um quarto de ponte, meia ponte e ponte completa [36].

A técnica de medida em um quarto de ponte consiste na utilização de um extensômetro posicionado em um dos braços, o qual estará colado no material a ser ensaiado, e de resistores de precisão nos outros três braços[52].

Também é chamada de um quarto de ponte, a técnica de medida onde são instalados dois extensômetros em dois braços distintos da ponte, porém, um deles é instalado em um corpo de prova semelhante ao que será ensaiado o material, mas que não sofrerá deformação nenhuma devido ao carregamento, esse extensômetro é chamado de compensador, enquanto o outro é chamado de extensômetro ativo. Este tipo de ligação é interessante, pois anula as variações no extensômetro com relação a variação de temperatura sofrida pelo corpo de prova.

A técnica de medida em que utiliza dois extensômetros em braços diferentes da ponte é chamado de medida em meio ponte. Também tem-se a técnica de medida que utiliza os quatro extensômetros ligados em cada um dos braços da ponte, chamada de leitura em ponte completa.

A variação da resistência elétrica do extensômetro, devido a deformação relativa ocorrida no corpo de prova, provoca um desequilíbrio na ponte. Ocorrendo então uma variação de tensão de saída da ponte O mesmo é lido em uma placa de aquisição de dados, as informações coletadas pela placa são tensões em escalas de mV. Estes dados aquisitados podem ser processados e transformados em grandezas requeridas pelo usuário, como micro deformação, tensão e força.

Outros equipamentos podem ser acoplados ao sistema para que se possa reduzir os erros, em função dos ruídos, bem como agilizar o processo de medição. Na Figura 18, pode-se observar um esquema básico de medição por meio de extensômetros.

Em princípio todos os extensômetros podem ser utilizados em soluções de problemas de análise de tensão experimental ou na construção de transdutores. Porém deve-se analisar a aplicabilidade e características dos mesmos antes de sua utilização.

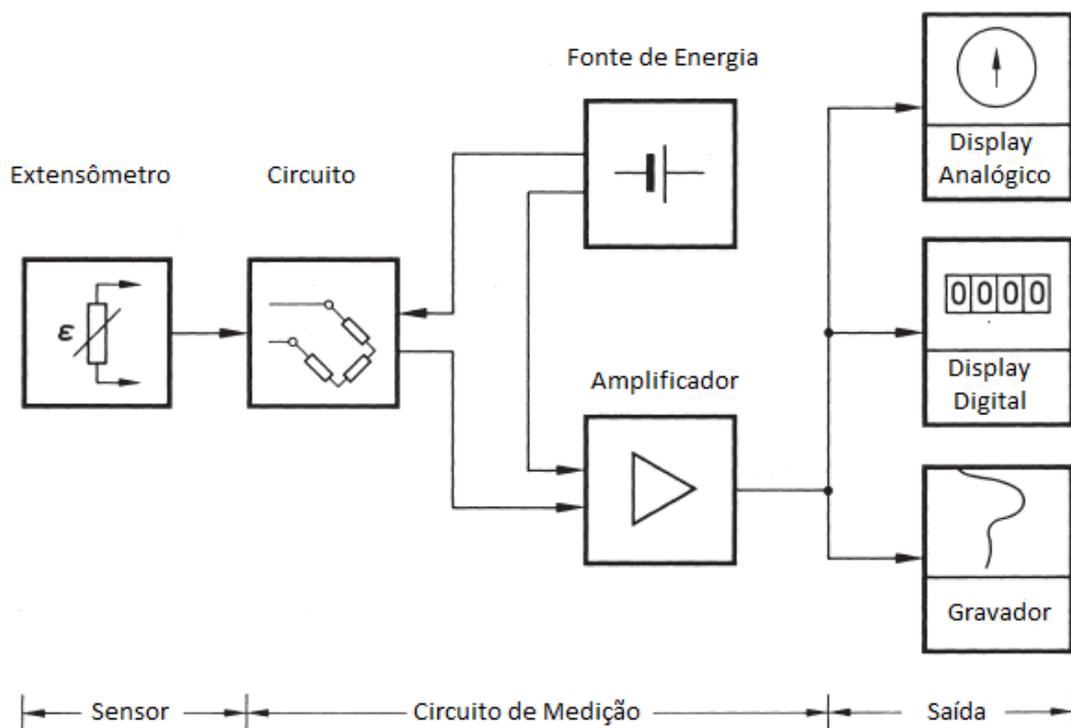


Figura 18 – Esquema básico de medição com extensômetros.

Além disso, para o correto uso e aplicação de extensômetros na medição de forças, faz-se necessário um processo de calibração dos mesmos, objetivando-se a correta mensuração e interpretação dos dados [53].

### 2.3.2. Normas e Calibração de Sistemas

A calibração consiste na aplicação de forças conhecidas a um transdutor de força e de registrar os dados a partir do mensurado, onde o mesmo é parte integrante do instrumento que está sendo medido. Para se fazer uma medição elétrica é necessário que o equipamento primeiramente esteja calibrado a partir de aplicação de forças conhecidas [55].

Conforme a ISO 376, deve-se seguir as etapas descritas para que o sistema de calibração esteja de acordo com especificações:

- A métrica utilizada de calibração deve estar documentada e que seja possível de rastreamento;
- Os valores do sistema de calibração devem ser equivalentes dos sistemas que serão mensurados;
- Deve-se utilizar dos dados de calibração para efetivamente aplicar nos dados dos mensurados;

- A incerteza do sistema de calibração não deve influenciar significativamente no sistema do mensurado, nunca deve ultrapassar  $1/3$  da incerteza do sistema de calibração.

Objetiva-se com a calibração a busca de um equilíbrio ou escala de calibração capaz de medir o que se pretende, além de indicar perfeitamente a carga aplicada em toda as condições. O propósito não é medir os pesos normalizados que estão se utilizando para a calibração, e sim a capacidade de medição a partir dessa carga aplicada. Não importa o quão perfeito essa carga pode ser, sempre haverá incertezas ou uma quantidade desconhecida relativa a calibração. O instrumentador deve-se preocupar em atribuir incertezas para cada medição [56].

Para que seja capaz de atribuir essas incertezas, o instrumentador deve possuir uma boa compreensão do equipamento e do processo de medição o qual está sendo utilizado. Sabendo-se as variáveis é possível que o instrumentador tenha capacidade de identificar todas as possibilidades de incertezas pertinentes ao sistema de medição. Por exemplo, mesmo que se tire qualquer aplicação de carga, o indicador de medição não está em zero, ou muito lentamente está retornando a zero. Isso faz com que se tenha um erro persistente no sistema, caracterizado como erro sistemático [56].

Além disso, podem existir muitas possíveis fontes de incerteza em um processo de calibração. Pode-se atribuir as seguintes incertezas:

- Incerteza ou tolerância da carga aplicada;
- Repetitividade do sistema de calibração;
- Legibilidade do sistema de calibração;
- Capacidade de reprodução do mesmo sistema de calibração para diversos sistemas;
- Além de: temperatura, não carregamento no ponto correto, ruídos elétricos, vibração, entre outros.

O instrumentador deve ser capaz de identificar as influências que afetam o resultado de medição, e ser capaz de estimar quanto cada influência afeta a indicação de equilíbrio. Essas quantidades estimadas devem ser documentadas como incertezas no processo de calibração [36]. Devem ser seguidos oito passos para documentação de incertezas, sendo:

- Especificar o processo que está sendo executado, de clara forma e concisa o que está sendo medido e os parâmetros que influenciam essa medição;

- Identifique e caracterize as fontes de incerteza;
- Quantificar os componentes de incerteza;
- Converter as fontes de incerteza em desvio padrão;
- Definir as incertezas combinada do padrão;
- Definir as incertezas expandidas;
- Avaliar as incertezas com questionamentos, por exemplo, essas incertezas fazem sentido? Qual o tamanho dessa incerteza? Deve-se seguir com a medição?
- Reporte e documente as incertezas

Desta maneira, deve-se sempre avaliar influências nos sistemas, e novamente ressalta-se que sistemas não são imunes a falhas e erros de medição. O que se pretende medir poderá conter erro desde que controlados e especificados em documentos.

### **2.3.3. Erros de Medição**

Idealmente, a indicação apresentada por um Sistema de medição deve corresponder ao valor verdadeiro do mensurando. Infelizmente não é isso que sempre acontece. As imperfeições do sistema de medição, as limitações do operador e as influências das condições ambientais são exemplos de fatores que induzem aos erros de medição. Por melhor que seja a qualidade do sistema de medição, por mais cuidadoso e habilidoso que seja o operador e por mais bem controladas que sejam as condições ambientais, ainda assim, em maior ou menor grau, o erro de medição estará presente [57].

Indesejável, mas inevitável, o erro de medição não pode ser ignorado. Negar a sua existência seria outro erro. Desde que sejam entendidas as causas e a natureza do erro de medição, é possível conviver com ele e ainda obter informações confiáveis de um processo de medição [35]. O erro está presente toda vez que o comportamento real de um sistema se afasta do ideal. O erro é classificado em alguns tipos sendo:

- Erro sistemático: aquele que é previsível, correspondente ao erro médio;
- Erro aleatório: é a parcela imprevisível do erro. É o agente que faz com que as repetições levem a resultados diferentes.

Além disso, tem-se a exatidão que é a capacidade de um sistema funcionar sem erros, tendo sempre um ótimo desempenho. Um sistema que sempre acerta é um sistema com ótima

exatidão. Esta é uma característica qualitativa que não pode ser associada a um número. E ainda, tem-se a precisão, que significa pouca dispersão, isto é, capacidade de obter sempre o mesmo resultado quando repetições são efetuadas. Dizer que um sistema é preciso, não significa dizer que sempre acerta, mas apenas que se comporta sempre da mesma forma nas mesmas condições. A precisão também se trata de um parâmetro qualitativo. Então, precisão e exatidão são dois parâmetros qualitativos associados ao desempenho de um sistema. Um sistema com ótima precisão repete bem, com pequena dispersão. Um sistema com excelente exatidão não apresenta erros [58].

Não há sistema de medição perfeito. Limitações tecnológicas e econômicas levam a construção de sistemas de medição não-ideais. Há imperfeições nas partes que os compõem, nas conexões, nos conjuntos, nos circuitos e nos demais módulos. O próprio princípio físico de operação do sistema de medição pode dar origem a erros de medição [58]–[60].

Nos sistemas de medição elétricos, as conexões e propriedades dos componentes eletrônicos, assim como o desempenho dos circuitos são as maiores fontes de erros internos. As não-idealidades dos circuitos eletrônicos geram erros de medição. As propriedades dos vários componentes eletrônicos, que não coincidam exatamente com os valores de projeto, tendem a se degradar com o envelhecimento natural dos componentes, afastando ainda mais o desempenho dos circuitos do ideal. Resistências ôhmicas, tensões termoelétricas e galvânicas nos contatos e conexões são outros fatores que, em maior ou menor grau, podem dar origem a erros de medição [57], [61].

O ambiente no qual o sistema de medição está inserido pode influenciar o seu comportamento. A presença de fortes campos eletromagnéticos, flutuações da tensão e variações na frequência da rede elétrica e da temperatura são fatores que podem afetar o comportamento dos sistemas de medição elétricos [55].

Para se obter resultados confiáveis de medições, é necessário tomar alguns cuidados. A forma mais segura é manter estáveis e controladas as condições ambientais que têm maior influência sobre o processo de medição. O uso de salas climatizadas e fontes de tensão elétrica estabilizadas são práticas comuns.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo geral dos testes experimentais executados está em demonstrar a capacidade em se utilizar extensometria e instrumentação para medir as forças atuantes na ferramenta de ISF. Desta maneira, os testes iniciais em caráter experimental visaram em um primeiro momento efetuar a calibração dos extensômetros. Após a calibração executou-se os cálculos analíticos para confrontar os dados apresentados no experimento comparando-se com os dados fornecidos pelos cálculos da resistência dos materiais. Executou-se ainda uma contraprova para os dados experimentados e cálculos analíticos por meio de Simulação Numérica.

Após calibração e validação dos resultados partiu-se para os testes preliminares objetivando-se identificar o funcionamento da aplicabilidade dos extensômetros na ferramenta, e ainda para verificar o comportamento das forças em tração e compressão. Para este caso foram efetuados 04 ensaios com chapas de latão de espessura  $s_0 = 0,5\text{mm}$  alternando-se o comportamento da ferramenta em flexão observando-se a leitura dos dados. Após os testes preliminares, realizou-se o processo de ISF em 09 diferentes chapas, procurando-se variar a espessura da chapa ( $s_0 = 0,5\text{mm}$ ;  $s_0 = 0,7\text{mm}$  e  $s_0 = 1,0\text{mm}$ ) e também o ângulo de parede ( $\psi$ ) sendo  $57^\circ$ ,  $58^\circ$  e  $59^\circ$ .

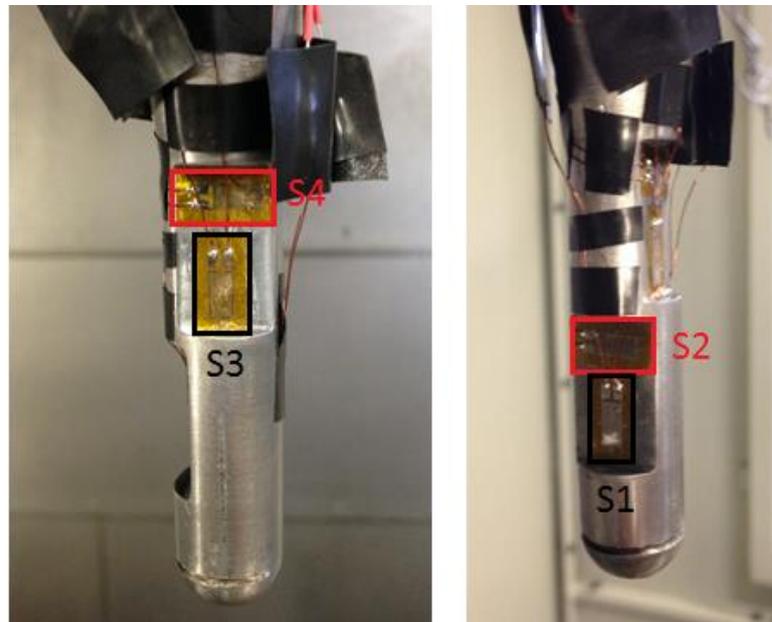
#### 3.1. Confecção de Ferramenta, Escolha e Colagem de Extensômetros

Para o estudo apresentado foi confeccionada uma ferramenta com ponta semiesférica, em aço 4340, com diâmetro de 15mm. No corpo da ferramenta foram confeccionados rebaixos objetivando-se uma maior aderência e fixação dos extensômetros em uma superfície plana, já que na superfície cilíndrica poderia ter-se problemas de fixação uniforme do extensômetro junto a ferramenta.

Os extensômetros utilizados no processo foram da marca Excel Sensores, do tipo PA-06-250BA-350-L. São dispositivos unidirecionais simples, ou seja, com capacidade de medição de deformações axiais. Possuindo a base de polimida laminado e grade metálica formada por 55% de níquel e 45% de cobre. O dispositivo selecionado possui autocompensador de temperatura para o aço com dimensões da grelha de 6,35mm x 3,18mm. A resistência elétrica do mesmo é de  $350\Omega \pm 0,5\%$ , sendo seu limite de capacidade de medição, ultrapassando este valor o extensômetro danifica devendo ser descartado. Além disso, possui um valor de

sensibilidade  $K = 2,12\% \pm 1\%$ , o Apêndice A possui o detalhamento completo. Após escolha partiu-se então para colagem dos extensômetros na ferramenta.

Conforme recomendações já citados anteriormente, optou-se por um material colante de secagem rápida. Os próprios fabricantes possuem materiais colantes, porém para este estudo utilizou-se um material colante a base de éster de cianocrilato. Toda a parte traseira da base do extensômetro deve estar em contato com o material colante, o mesmo deve-se fazer na região da ferramenta onde o mesmo será colado. Como forma de auxílio para este procedimento, utilizou-se um pincel de 2mm para espalhar a quantidade de cola necessária, bem como efetuar a pressão necessária para contato de toda a superfície do extensômetro junto a ferramenta. Outra recomendação é que se use uma cola recém-aberta para o procedimento de colagem, não se deve utilizar um material colante já em contato anteriormente com o ambiente. A verificação do procedimento de colagem foi efetuada de maneira qualitativa, após aguardar cerca de alguns minutos para processo de cura da colagem, utilizou-se um estilete para validação da fixação dos quatro extremos dos extensômetros. Além disso, validou-se visualmente se toda a superfície do extensômetro estava em contato com a ferramenta. A Figura 19 apresenta as vistas laterais da ferramenta, podendo-se observar o detalhamento dos Sensores S1, S2, S3 e S4.

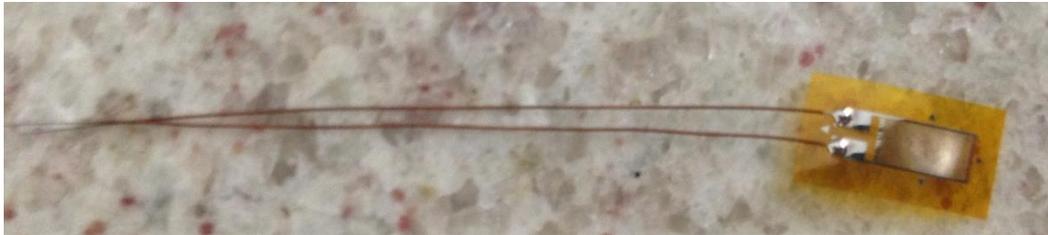


*Figura 19 – Ferramenta em Aço 4340 com extensômetros fixados.*

### **3.2. Soldagem de Filamentos e Leitura de Sinais**

Os extensômetros adquiridos para os experimentos foram solicitados ao fabricante que viessem com os filamentos de soldagem nos fios, desta forma, procura-se facilitar o

procedimento de leitura e aquisição dos sinais. Na Figura 20 pode-se observar os extensômetros utilizados nos experimentos com detalhes dos filamentos já fornecido pelo fabricante. Foi efetuado o processo de soldagem dos filamentos dos extensômetros a cabos CCI (Capa, Condutor e Isolamento) de 4 vias possuindo cada via diâmetro de 0,4mm, para o estudo foram utilizadas apenas duas vias como condicionadores de sinais até a bancada de medição. O processo de soldagem deu-se por meio de ferro de solda comum com estanho. Deve-se tomar cuidado no procedimento de soldagem efetuando-se o contato do ferro de solda com o filamento o mais breve possível, evitando-se que se danifique o condutor e a solda junto a base do extensômetro.



*Figura 20 – Extensômetro Excel modelo PA-06-250BA-350-L com detalhes de filamento.*

As leituras dos sinais apresentados pelos extensômetros, foram feitas utilizando-se um instrumento de medição da marca HBM. Este Sistema de Aquisição de Dados (*Data Acquisition System*) Quantum X consegue efetuar diversas medições e controles de sinais. O modelo utilizado nos experimentos foi o QuantumX MX840B (Figura 21), tratado com um amplificador universal de 8 canais, este dispositivo vai ligado a um computador via conexão FastEthernet (RJ-45) para aquisição dos sinais. Este dispositivo está disponível no departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC.



*Figura 21 – Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) QuantumX MX840B [62].*

Também foram utilizados recursos de software ligados a computador para serem efetuados os procedimentos experimentais. Para a comunicação do DAQ da HBM, contemplando hardware e software para aquisição, foram ainda utilizados os softwares Quantum X Assistant que pode ser observado sua tela na Figura 22a, este possuindo a função de comunicação entre o DAQ, que está ligada aos extensômetros e o Computador, dispositivo necessário para armazenamento dos dados aquisitados. Para a leitura e interpretação dos sinais coletados foi utilizado o software Catman Easy (Figura 22b), que fornece os gráficos da medição da deformação relativa sentida pelo extensômetro em função do tempo em segundos e permite a exportação dos dados em outros formatos para posterior análise.

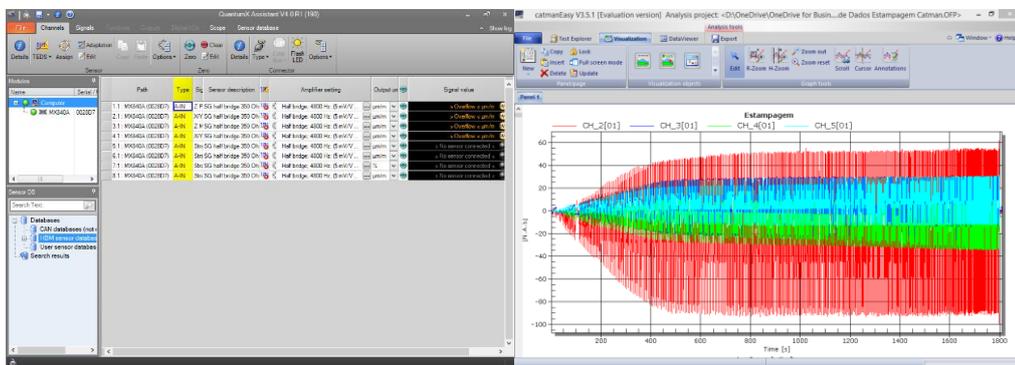


Figura 22 - Software Quantum X (a) e Catman Easy (b).

Além disso, uma configuração importante que deve ser feita no software Quantum X Assistant é configurar o Fator de Sensibilidade K do Extensômetro utilizado, o padrão que o software traz é  $k = 2$ , devendo ser alterado para o fornecido no *datasheet* do fabricante do extensômetro, para o caso desse estudo alterou-se essa propriedade junto ao sensor utilizado como  $\frac{1}{4}$  de ponte, como sendo  $k = 2,12$ . A Figura 23 demonstra esta configuração na Base de Sensores do software Quantum X Assistant.

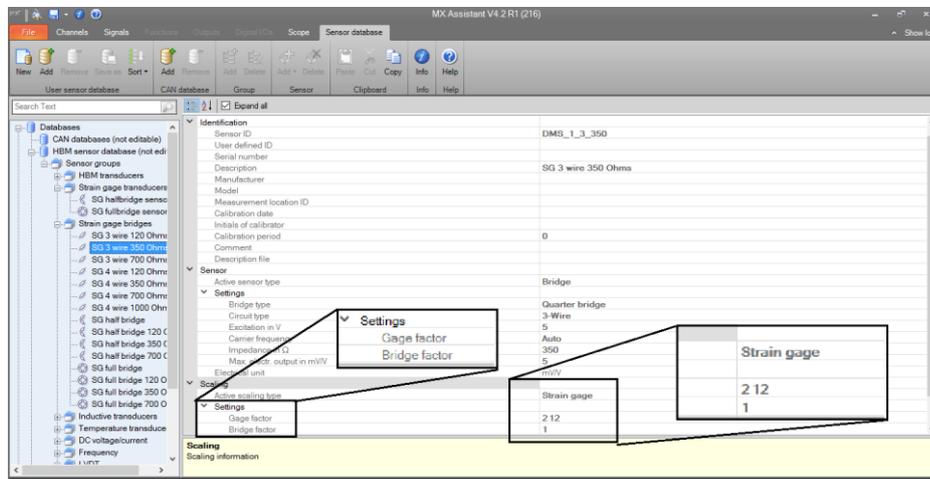


Figura 23 – Detalhe da configuração de Fator de Sensibilidade K do extensômetro.

Após etapa de configuração de parâmetros de software e customizações para experimento aqui apresentado, parte-se então para a etapa de calibração e validação de funcionamento dos extensômetros.

### 3.3. Processamento de Sinais de Calibração dos Extensômetros

Antes de efetuar os procedimentos de ISF, deve-se calibrar os extensômetros com forças conhecidas para posterior análise e contabilização das forças durante o processo de ISF. Para a calibração dos extensômetros, foram utilizados pesos de 5kg, 10kg e 20kg, podendo ser observados na Figura 24. Para o procedimento de calibração a ferramenta foi fixada em uma morsa de bancada, onde os pesos são pendurados por cabo de aço fixado na própria ferramenta. Recomenda-se durante as trocas dos pesos, que se faça uma observação dos dados de medição, para verificação se o sensor retorne próximo a medição de 0mV [46][48]. Isso deve-se principalmente ao fato de analisar se o extensômetro utilizado não sofreu qualquer tipo de dano após a colocação de pesos.



*Figura 24 - Pesos com massa especificada.*

A calibração deu-se primeiramente para o Sensor S1, colocando-se os pesos e medindo-se os sinais apresentados. Após, girou-se a ferramenta em 90° na morsa de bancada para efetuar a calibração do Sensor S3. A Figura 25 mostra a vista superior do mecanismo utilizado, nesta posição calibra-se o Sensor S3. Pode-se observar também o detalhe de como o peso foi fixado na ferramenta por meio dos cabos de aço. Na Figura 26, observa-se os pesos colocados, e a ferramenta sendo primeiramente calibrado o Sensor S1 e após o Sensor S3.



Figura 25 - Ferramenta presa a morsa de bancada para calibração de extensômetros.



Figura 26 – Calibração Sensor S1 e Sensor S3 a partir de colocação de pesos.

Aplicando-se os pesos de 5kg, 10kg, 15kg e 20kg, os sensores conseguem deformar-se, obtendo-se assim valores das medições. As leituras dos dados fornecidos pelo DAQ são exportados em formato ASCII a partir do software Catman Easy. A partir desse dado exportado, consegue-se importar esses dados para o software Matlab<sup>®</sup>. Uma vez que os dados estejam importados no software, executa-se o processamento dos sinais apresentados pelos extensômetros. Na Figura 27 apresenta-se os valores lidos pelos sensores durante a calibração, onde pode-se observar os dados do Sensor S1 (Figura 27A) e Sensor S3 (Figura 27B) com os pesos aplicados (5kg, 10kg, 15kg e 20kg).

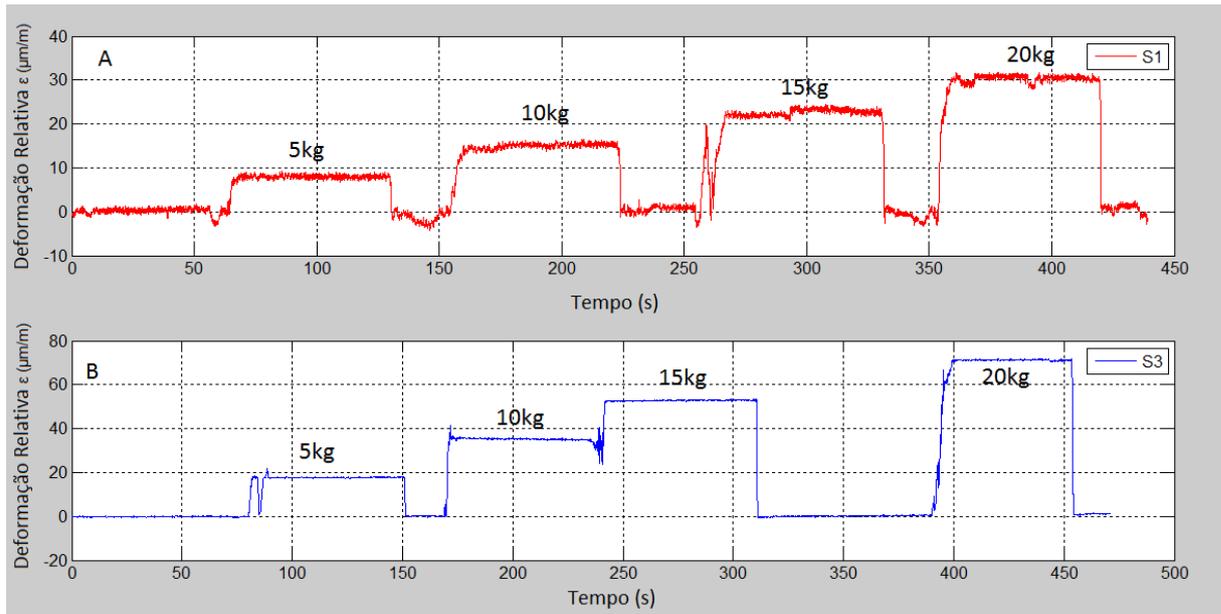


Figura 27 – Deformação relativa ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) em função do Tempo (s) de Deslocamento da ferramenta obtidos nos Sensores S1 (A) e S3 (B) durante a colocação dos pesos de 5kg, 10kg, 15kg e 20kg.

Observa-se ainda pela Figura 27 que após a retirada dos pesos, o sensor retorna como medição de  $0\mu\text{m}/\text{m}$ , comportamento considerado normal. Caso o sensor tivesse algum tipo de problema, ele teria oscilado e não retornaria a nulo bruscamente. Portanto, a calibração dos extensômetros ocorreu sem problemas reportados.

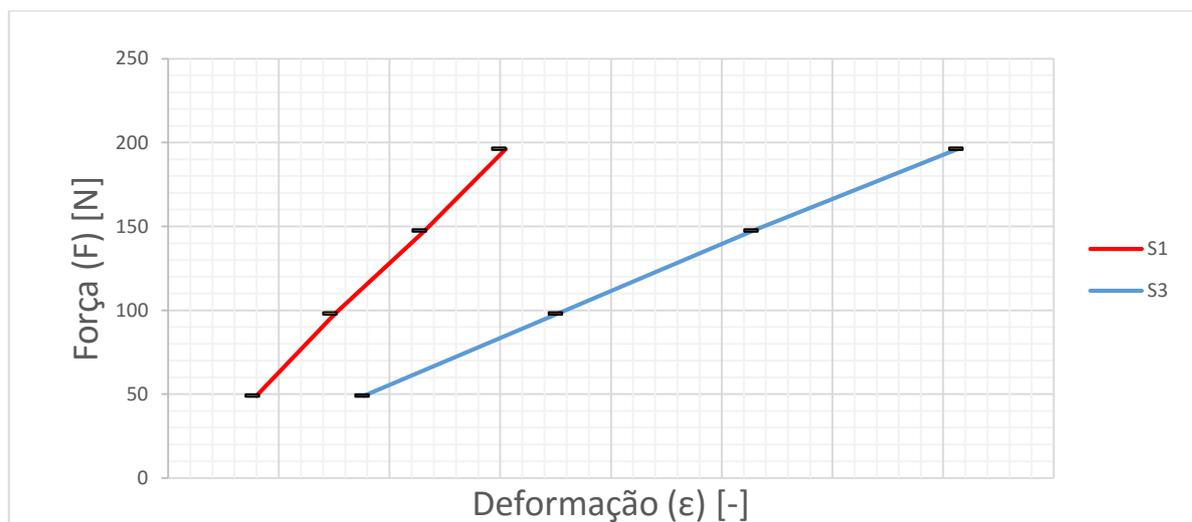
Devido a sensibilidade dos extensômetros, diversos parâmetros podem influenciar no seu funcionamento, inclusive as oscilações por parte da rede elétrica onde os equipamentos de aquisição e leitura dos sinais estão ligados. Desta maneira, como forma de evitar as interferências por via elétrica e também para tornar o sinal lido mais limpo, usou-se um equipamento Nobreak da marca SMS, modelo *Manager III Senoidal u SM 1400Bi 115 NG*, possuindo características como Potência de 1400VA e Frequência de 60Hz, além de tensão de entrada de 115/127/220V~ e Saída de 115V~. O DAQ foi ligado diretamente ao Nobreak em modo de bateria bem como o computador, retirando assim a interferência do sinal elétrico da rede comum.

A partir dos dados obtidos dos Sensores S1 e S3 calculou-se a média dos sinais para cada peso, e após utilizou-se a Lei de Hooke (Eq 1), com o módulo de elasticidade para os aços de  $E = 210.000\text{MPa}$ , para calcular as Tensões medidas pelos extensômetros durante a calibração. Apresenta-se na Tabela 1 os valores calculados pelo produto da deformação obtida pelos Sensores com o Módulo de Elasticidade. Pode-se observar que a coluna Força (N) traz os dados de produto da massa utilizado em quilograma pela gravidade, sendo  $g = 9,81\text{m}/\text{s}^2$ .

*Tabela 1 – Dados adquiridos e calculados a partir dos extensômetros na ferramenta.*

Ensaio	Peso (kg)	Força (N)	S1		S3	
			$\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$\varepsilon$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
1	5	49,05	7,97	1,68	17,67	3,71
2	10	98,1	15,10	3,17	35,23	7,40
3	15	147,15	23,18	4,87	52,82	11,09
4	20	196,2	30,51	6,41	71,33	14,98

Apresenta-se também a Figura 28, a qual contém os dados de desvio padrão por parte da calibração efetuada nos Sensores S1 e S3 com as forças conhecidas aplicadas. Pode-se observar pelos dados apresentados que o desvio padrão apresentado na leitura dos sinais não teve valores consideráveis. Sendo assim, se observarmos todos os dados lidos enquanto o peso estava aplicado a variação que ocorreu durante a experimentação de calibração dos extensômetros sofreu pequenas variações.



*Figura 28 – Calibração para as forças conhecidas aplicadas para os Sensores S1 e S3, com os respectivos desvios padrão.*

Desta forma, pelos dados apresentados, a calibração apresenta resultados satisfatórios perante normas de calibração já citadas anteriormente. Podendo-se usar este método para outros estudos, bem como dar sequência ao estudo proposto neste trabalho.

### 3.4. Controle de Temperatura

A medida de deformação relativa em um corpo de prova que o extensômetro irá efetuar é bastante pequena. Desta maneira, a influência da temperatura é bastante significativa dependendo da aplicação utilizada. Os fabricantes de extensômetros procuram minimizar a sensibilidade a temperatura

fabricando o material do extensômetro da mesma forma que o material ao qual o mesmo será aplicado, como forma de compensação para o material. Além disso, os fabricantes provêm uma ficha de dados (*datasheet*) do extensômetro, o qual traz informações da temperatura e coeficientes de operação dos mesmos.

Como forma de monitoração e controle da temperatura durante a calibração e a estampagem utilizou-se um Termovisor Fluke Ti32, o qual possui faixa de operação de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+600^{\circ}\text{C}$ , tendo uma precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , permitindo ainda ter correção de Emissividade via software *SmartView*. Este dispositivo está disponível no departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade SATC (Figura 29).



Figura 29 – Termovisor Fluke Ti32[63].

Para este experimento foram utilizados extensômetros da marca Excel Sensores, aplicados ao aço, contendo a Tabela 2 como autocompensation da temperatura. Pode-se observar pela Figura 30 que durante o processo de calibração dos extensômetros o corpo de prova, neste caso a ferramenta de ISF, não variou consideravelmente a temperatura em sua superfície, ficando em torno de  $2^{\circ}\text{C}$  em relação ao ambiente.

Tabela 2 – Tabela de autocompensation de temperatura.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Temperatura ( $\mu\epsilon$ )	-120	-80	-30	-10	+10	+20	+20	+10	-10	-20	-40	-50	-70

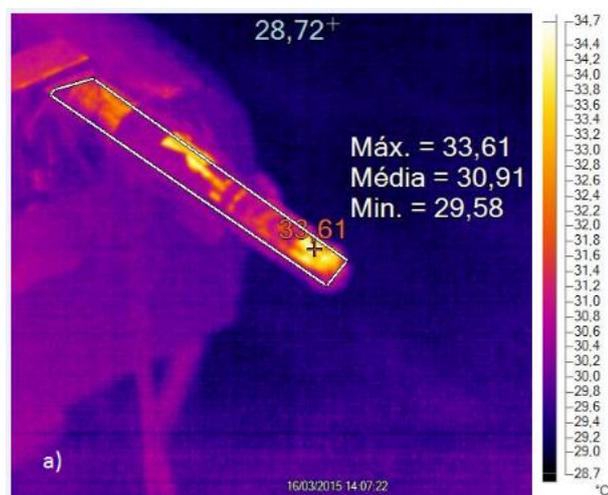


Figura 30 – Controle de Temperatura durante a calibração.

Devido à falta de referências no estado da arte de tensões e deformações nas ferramentas de ISF, buscou-se alternativas para validação dos dados de calibração. Duas alternativas foram desenvolvidas neste sentido, uma no que tange os cálculos analíticos do Momento Fletor da Ferramenta, além da Simulação Numérica por meio de software de simulação.

### 3.5. Cálculos Analíticos do Momento Fletor da Ferramenta

Durante o processo de calibração da ferramenta e da ISF, a ferramenta apresenta movimento de Flexão, conforme pode ser observado na Figura 31, ainda pode-se observar o centroide a partir da vista frontal da seção da ferramenta pela Figura 32.

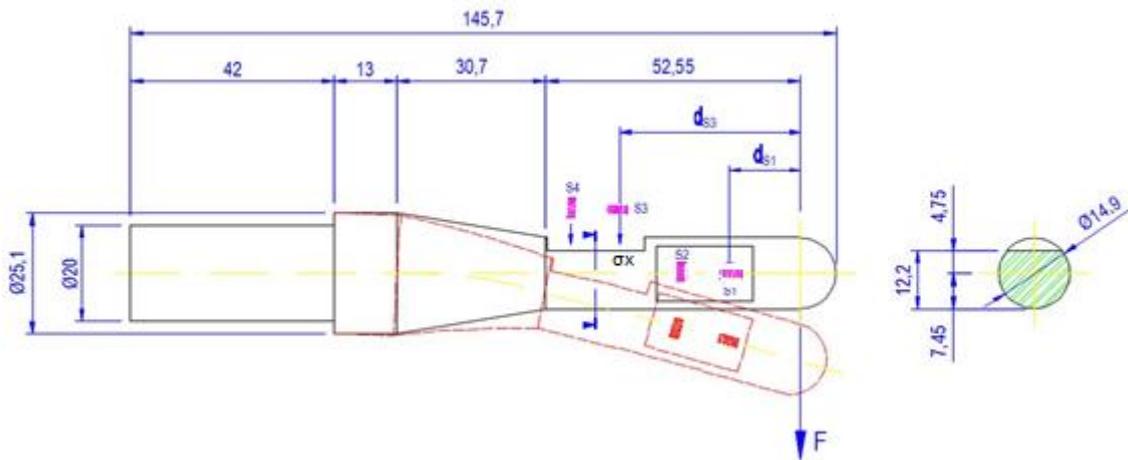


Figura 31 - Exemplificação de momento fletor na ferramenta de ISF.

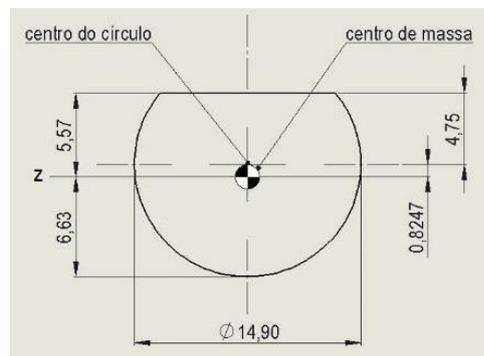


Figura 32 - Detalhes do Centroide da Ferramenta.

A partir do movimento apresentado pela ferramenta durante o processo de calibração, os cálculos analíticos foram executados conforme definições matemáticas do momento fletor (M). O momento fletor (M) é definido por:

$$M = F \cdot d \quad (Eq\ 25)$$

Onde:

F: força (N);

d: distância do ponto de medição até o ponto de aplicação da força (mm);

E ainda:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I_z} \quad (Eq\ 26)$$

Onde:

$\sigma_x$ : Tensão normal em x.

y: É a distância do ponto de medição da tensão ao eixo centroide da seção;

$I_z$ : Momento de Inércia em z;

Portanto, juntando-se a Equação 25 na Equação 26, tem-se:

$$\sigma_x = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} \quad (Eq\ 27)$$

Desta maneira, observando-se a Figura 31, tem-se o detalhamento dos valores de  $d_{S1}$ , ou seja, distância entre a aplicação da força em relação ao Sensor S1, desta maneira obtém-se  $d_{S1} = 12\text{mm}$ . Para Sensor S3 tem-se  $d_{S3} = 28\text{mm}$  devido a distância entre a aplicação da força em relação ao posicionamento do Sensor S3. Para o Eixo centroide da Ferramenta, ou valor de y, tem-se  $y=5,57\text{mm}$ , que pode ser observado na Figura 32.

O Momento de Inércia ( $I_z$ ) foi calculado a partir da Teoria dos Eixos Paralelos, que é definido por uma relação entre o momento de inércia  $I_p$  em relação a um eixo por um ponto P arbitrário e o Momento de Inércia  $I_{cm}$  em relação a um eixo paralelo passando pelo centro geométrico da área que representa a seção do objeto [64]. A partir das Figura 31 e Figura 32 calcula-se o Momento de Inércia para a ferramenta confeccionada para este estudo, primeiramente calculando-se o Momento para a circunferência completa (Equação 28), posteriormente executa-se o cálculo da parte retirada da ferramenta, devido ao rebaixo confeccionado (Equação 29), e finalmente diminuindo-se um momento pelo outro, aplicando-se a Teoria dos Eixos Paralelos (Equação 30). Desta maneira:

Para o círculo, tem-se:

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4} = 2419,44 \text{mm}^4 \quad (\text{Eq 28})$$

Para a seção retirada da ferramenta, de acordo com a Figura 33, tem-se:

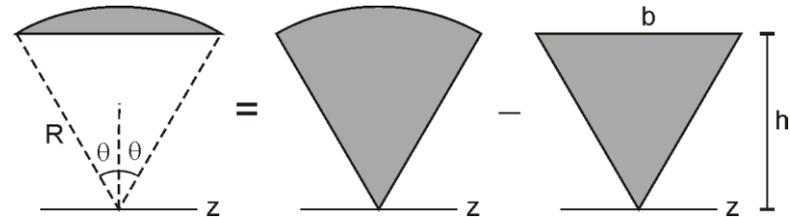


Figura 33 – Representação da parte retirada da ferramenta.

$$I_{z'} = \frac{r^4}{8} \left( 2\theta - \frac{1}{2} \text{sen}(2\theta) \right) = 488,15 \text{mm}^4 \quad (\text{Eq 29})$$

Aplicando-se a Teoria dos Eixos Paralelos:

$$I_z = \left( \frac{\pi r^4}{4} + (\pi r^2 \cdot y'^2) \right) - (I_{z'} - (a \cdot y'^2)) = 2035,24 \text{mm}^4 \quad (\text{Eq 30})$$

Onde:

r: Raio da circunferência completa;

y': Diferença entre o centroide original da circunferência com a nova geometria

Iz': Momento de Inércia da parte retirada da circunferência completa;

a: Área da parte retirada da circunferência completa;

Portanto, para os cálculos analíticos utilizou-se do Momento de Inércia em Z de  $I_z = 2419,44 \text{mm}^4$ . Desta forma, a partir das informações aferidas em medições na ferramenta aplica-se a Equação (27) para cálculo das tensões no ponto onde foi colado o Sensor S1 e S3. Sendo utilizados os pesos de 5kg, 10kg, 15kg e 20kg.

A tensão em x, para os sensores S1 e S3 com  $F=5\text{kg} \rightarrow F = 5 \times 9,81 = 49,05\text{N}$  poderá ser calculada por:

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 49,05\text{N} \cdot 12\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2419,44 \text{mm}^4} = \pm 1,61 \text{N/mm}^2$$

Sendo:

F: 49,05N

dS1: 16mm

y: 5,57mm

Iz: 2419,44mm<sup>4</sup>

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 49,05N \cdot 28mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 3,76N/mm^2$$

Sendo:

F: 49,05N

dS3: 36mm

y: 5,57mm

Iz: 2419,44mm<sup>4</sup>

A tensão em x, para os Sensores S1 e S3 com F=10kg → F=98,1N:

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 98,1N \cdot 12mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 3,22N/mm^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 98,1N \cdot 28mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = 7,52N/mm^2$$

A tensão em x, para os Sensores S1 e S3 com F=15kg → F=147,15N:

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 147,15N \cdot 12mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 4,83N/mm^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 147,15N \cdot 28mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 11,28N/mm^2$$

A tensão em x, para os Sensores S1 e S3 com F=20kg → F=196,2N:

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 196,2N \cdot 12mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 6,44N/mm^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} = \frac{\pm 196,2N \cdot 28mm \cdot 5,57mm}{2419,44mm^4} = \pm 15,03N/mm^2$$

Outro método aplicado para comparação com a calibração efetuada dos extensômetros foi a Simulação Numérica, este procedimento fica como uma contra-prova do experimento apresentado durante a calibração dos extensômetros.

### 3.6. Simulação Numérica

Para a Simulação Numérica foi utilizado software CAD SolidWorks 2014<sup>®</sup>, por meio do módulo *Simulation*. Este módulo permite que sejam efetuadas Análise de Elementos Finitos simulando deslocamentos, tensões, vibração, flambagem, fluxo de calor, entre outros. Para este trabalho foi efetuado a simulação da Flexão, o qual ocorre no processo de calibração e estampagem.

Apresenta-se na Figura 34a, uma visão lateral da ferramenta quando em estado de flexão com uma força aplicada de 196,2N, ou seja, 20kg, na imagem está sendo observado o comportamento para o Sensor S1. Constata-se pelo gradiente de identificação na Figura 34b, com vista superior da ferramenta, que a tensão no ponto onde o Sensor S1 foi colocado está em aproximadamente 8,75N/mm<sup>2</sup>.

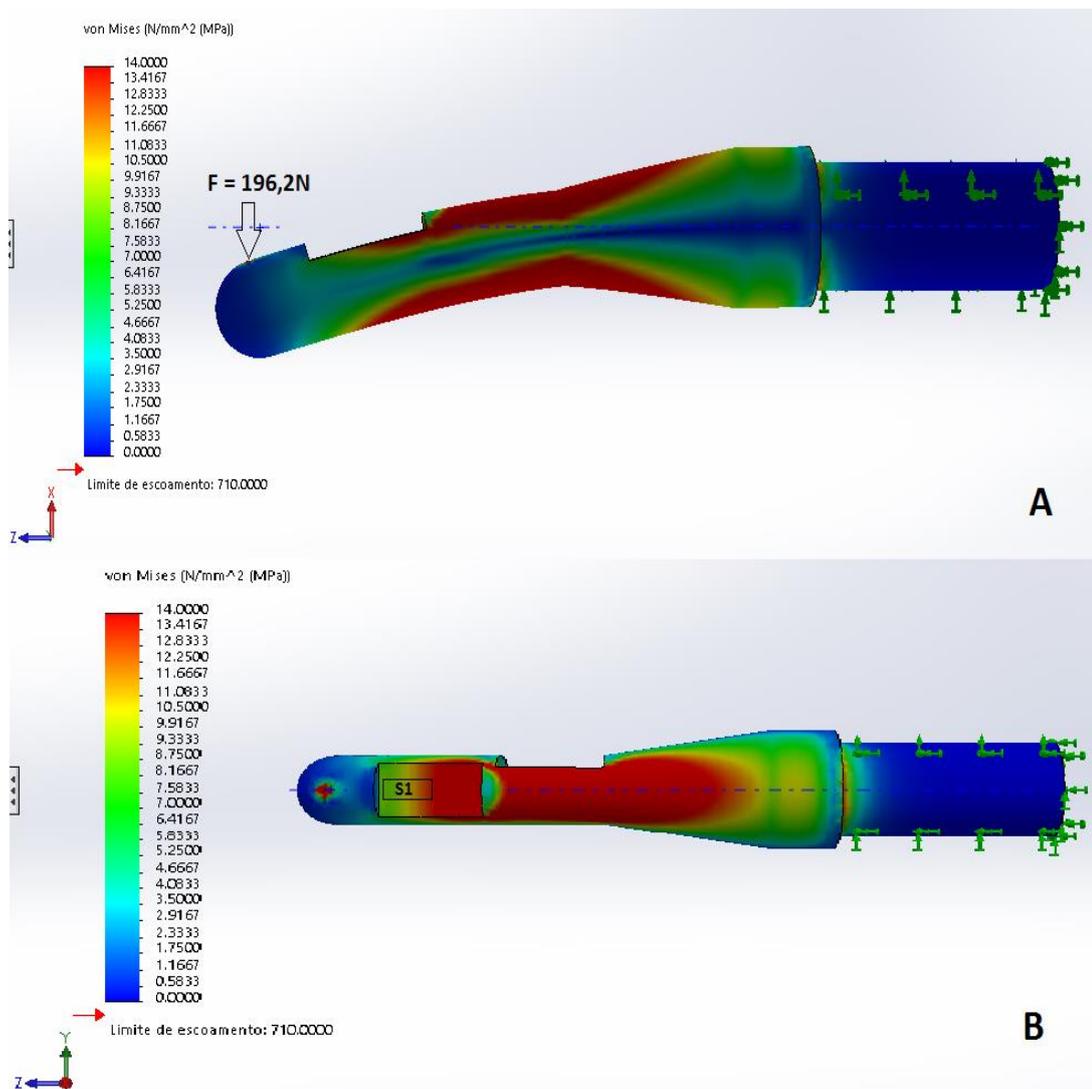


Figura 34 – Simulação Numérica com carga de 196,2N com detalhamento de Sensor S1. A) Vista Lateral e B) Vista Superior.

Para o Sensor S3 também foram simulados as aplicações de forças de 49,05N, 98,1N, 147,15N e 196,2N. Constata-se pela Figura 35a, que devido ao momento fletor, as tensões nesta posição da ferramenta quando comparadas ao posicionamento do Sensor S1 são maiores. Este resultado corrobora com os resultados apresentados tanto nos cálculos analíticos quanto nos valores de deformação relativa medidos pelos extensômetros. Observando-se o gradiente na Figura 35b os valores aproximados medidos nessa região da ferramenta onde está localizado o Sensor S3 está próximo de 23,33N/mm<sup>2</sup>.

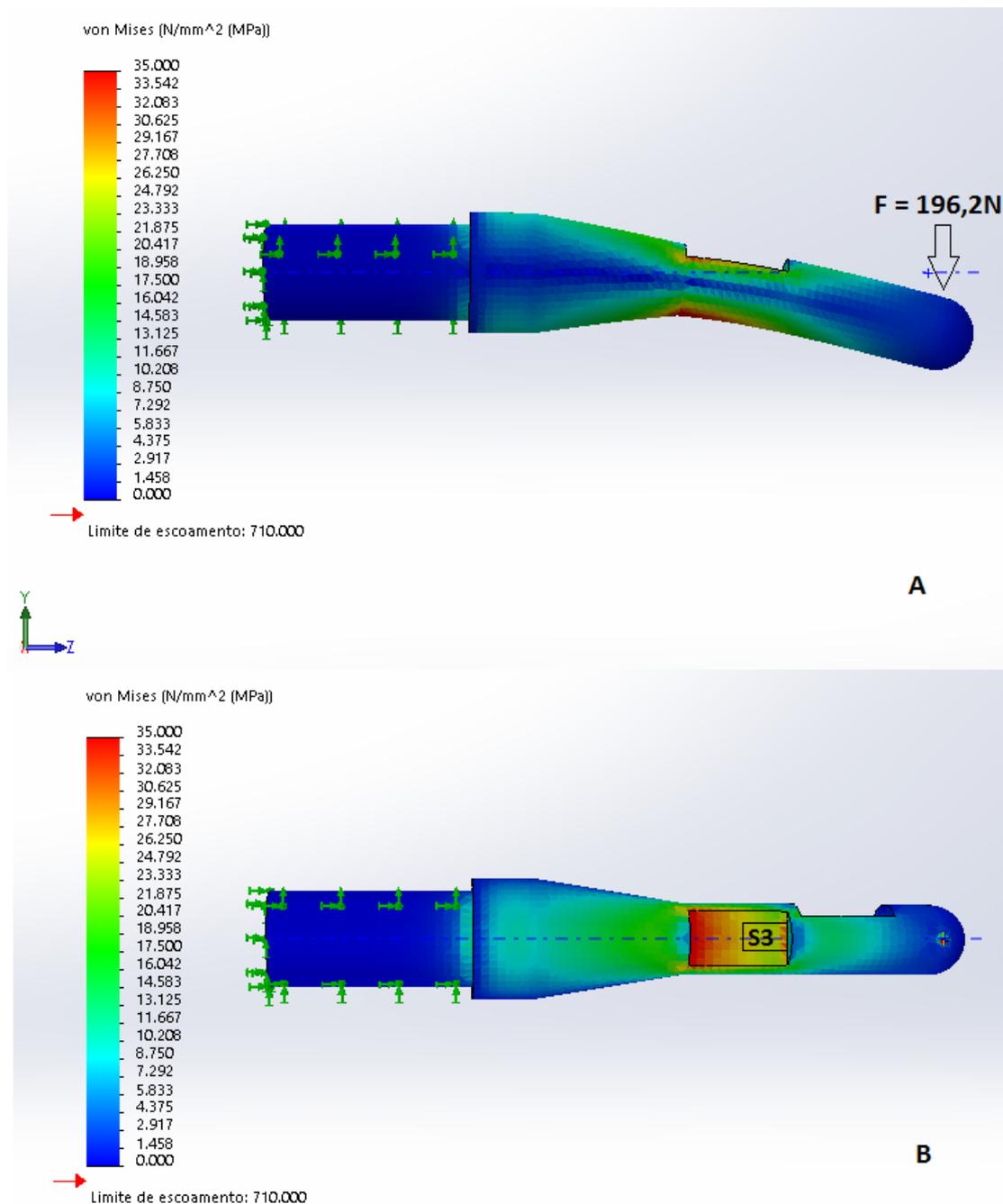


Figura 35 - Simulação Numérica com carga de 196,2N com detalhamento de Sensor S3. Vista Lateral (A) e Vista Superior (B).

Efetuuou-se então, após a calibração, cálculo analítico e a simulação numérica, uma comparação dos resultados apresentados. Esta comparação serve de embasamento para posterior aplicação da ferramenta em estudo no processo de ISF.

### 3.7. Validação da calibração dos extensômetros

Os dados obtidos no experimento da calibração foram comparados com os resultados apresentados no cálculo analítico e também com os dados coletados na simulação numérica. Definiu-se uma forma de comparação, a partir da Equação 31, dos resultados para identificar quanto de variação ocorreu dos dados apresentados nos três procedimentos. Este procedimento se deu da seguinte maneira:

$$Var = \frac{\sigma_{Exp} - \sigma_{Cal}}{\sigma_{Cal}} \cdot 100 \quad (Eq.31)$$

Onde:

Var: variação apresentada comparando-se a tensão do experimento com a tensão calculada analiticamente [%];

$\sigma_{Exp}$ : Tensão obtida no experimento [N/mm<sup>2</sup>];

$\sigma_{Cal}$ : Tensão calculada analiticamente [N/mm<sup>2</sup>].

A Tabela 3 e Tabela 4 contém os dados processados a partir do cálculo analítico, simulação numérica e experimento. O parâmetro  $\sigma_{Cal}$  como sendo a tensão calculada a partir do método analítico utilizado. O dado como  $\sigma_{Exp}$  como sendo a tensão do experimento realizado por meio de extensometria e, por fim, o dado como  $\sigma_{SN}$  como sendo a tensão apresentada pela Simulação Numérica.

Este cálculo foi efetuado também para comparar os dados dos cálculos analíticos com a simulação numérica, e ainda para comparar a variação obtida dos dados obtidos no experimento em relação a tensão durante a simulação numérica. Apresentado como resultado a Tabela 3 contendo os dados comparativos para o Sensor S1 e a Tabela 4 contendo os dados comparativos referentes a Sensor S3. O parâmetro  $\sigma_{Cal}$  como sendo a tensão calculada a partir do método analítico utilizado. O dado apresentado como  $\sigma_{Exp}$  trata-se da tensão do experimento realizado por meio de extensometria, e o  $\sigma_{SN}$  como sendo a tensão apresentada pela Simulação Numérica.

Tabela 3 – Dados comparativos entre Cálculo Analítico, Simulação Numérica e Leitura do extensômetro para o Sensor S1.

Força (N)	S1					
	$\sigma$ Cal. (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ Exp. (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ SN (N/mm <sup>2</sup> )	Variação [%]		
				( $\sigma$ Cal.x $\sigma$ Exp.)	( $\sigma$ Cal.x $\sigma$ SN.)	( $\sigma$ Exp x $\sigma$ SN.)
49,05	1,61	1,68	2,47	-4,16%	53,41%	47,02%
98,1	3,22	3,17	4,65	1,57%	44,40%	46,68%
147,15	4,83	4,87	6,80	-0,82%	40,78%	39,63%
196,2	6,44	6,41	8,75	0,46%	35,86%	36,50%

Tabela 4 – Dados comparativos entre Cálculo Analítico, Simulação Numérica e Leitura do extensômetro para o Sensor S3.

Força (N)	S3					
	$\sigma$ Cal. (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ Exp. (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ SN (N/mm <sup>2</sup> )	Variação [%]		
				( $\sigma$ Cal.x $\sigma$ Exp.)	( $\sigma$ Cal.x $\sigma$ SN.)	( $\sigma$ Exp x $\sigma$ SN.)
49,05	3,76	3,71	5,71	-1,34%	51,86%	53,90%
98,1	7,52	7,40	11,14	-1,59%	48,13%	50,54%
147,15	11,28	11,09	17,85	-1,71%	58,24%	60,95%
196,2	15,03	14,98	23,33	-0,33%	55,22%	55,74%

Os dados lidos por meio de extensometria tem-se uma média da variação de -0,73% para o Sensor S1, e para o Sensor S3 tem-se uma média de variação de -1,24%. Comparando-se aos resultados apresentados por Imram e Haneef [65] que atingiram uma variação média de -12,85% observa-se que em nosso estudo obteve-se valores satisfatórios de variação.

Quando se compara com os dados apresentados pela simulação numérica em relação ao cálculo analítico tem-se para o Sensor S1 uma média de variação de 43,61%, enquanto para o Sensor S3 tem-se uma média de variação de 53,36%. Comparando-se novamente com o estudo apresentado por Inram e Haneef [65], os mesmos obtiveram um resultado com uma média de variação de 22,57% porém utilizando o software Ansys<sup>®</sup>. Destaca-se nos dados de Simulação Numérica que a tensão apresentada pelo software Solidworks<sup>®</sup> é a tensão de Von Misses, sendo esta uma limitação/simplificação do software utilizado.

Portanto o método de calibração utilizado neste estudo é considerado válido. Deve-se observar que o estudo dos dados comparativos serve de base para identificar se o método de calibração está de acordo com os dados apresentados pelos cálculos analíticos e simulação numérica.

O comportamento da ferramenta durante a ISF é em flexão, desta maneira, efetuando-se a calibração dos extensômetros por meio das forças conhecidas aplicadas (49,05N; 198,2N; 147,15N e 196,2N) pode-se definir as forças que atuam sobre a ferramenta durante a ISF.

### 3.8. Coeficientes de força para ISF

Como objetivo principal do trabalho tem-se a análise das forças na ferramenta durante o processo de ISF, partiu-se de forças aplicadas conhecidas na ferramenta, para posterior análise durante a ISF. Desta maneira, foi criado um mecanismo (Equação 32) com o intuito de validar a força apresentada durante a ISF.

Conforme resultado apresentado durante a calibração, e de acordo com o desvio padrão apresentado durante o mesmo, optou-se por utilizar-se os dados de deformação relativa quando a ferramenta estava submetida a aplicação da força de 196,2N (20kg). Sendo assim, tem-se:

$$\frac{F_{ap}}{F_{cal}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ad}} \quad (Eq\ 32)$$

Onde:

$F_{ap}$ : força conhecida aplicada (196,2N);

$\varepsilon$ : deformação relativa obtida com a força conhecida aplicada;

$\varepsilon_{Ad}$ : deformação obtida pelo sistema de aquisição de dados;

$F_{cal}$ : força calculada;

Desta maneira, a partir dos dados de calibração, para o Sensor S1 estará sendo utilizado um coeficiente de força de  $F = 196,2N$  com uma deformação relativa de  $\varepsilon = 30,51$ , para o Sensor S3 estará sendo utilizado um coeficiente para a mesma força  $F = 196,2N$  sendo utilizado para uma deformação relativa de  $\varepsilon = 71,33$ . Demonstra-se um exemplo para o Sensor S3 com suposição de valores para  $\varepsilon_{Ad}$  pelo DAQ:

$F_{ap}$ : 196,2N

$\varepsilon$ : 71,33;

$\varepsilon_{Ad}$ : 152;

Tem-se então:

$$\frac{196,2N}{F_{cal}} = \frac{71}{152} \therefore F_{cal} = \frac{196,2N \cdot 152}{71} \therefore F_{cal} \cong 420N$$

Portanto, os dados apresentados nos testes preliminares e também na ISF estarão seguindo os coeficientes definidos dessa maneira. Utilizando-se os valores obtidos na calibração, com forças conhecidas aplicadas na ferramenta.

### 3.9. Teste preliminares

Os testes preliminares executados possuem o objetivo de validação do comportamento do extensômetro quando aplicado ao mesmo uma tensão relativa a força de deformação da chapa. Foram realizados um total de 04 (quatro) Ensaiois com chapas de espessura  $s_0 = 0,5\text{mm}$  analisando primeiramente o comportamento do Sensor S1 em tração e compressão, e posteriormente o Sensor S3 em tração e compressão.

A fim de reduzir o aquecimento e principalmente o atrito entre a chapa e a ferramenta de estampar, utilizou-se uma graxa a base de lítio UNILIT MPA-2. A consistência da mesma se dá em 2 (NLGI-2), com temperaturas de aplicação de até  $130^\circ\text{C}$  e com ponto de gota de  $185^\circ\text{C}$ . Este procedimento de lubrificação foi utilizado tanto nos testes preliminares quanto no processo final de ISF. Nos trabalhos desenvolvidos por [2][66][23][11][14][3] também foi utilizada graxa sintética sabão a base de lítio.

Os testes preliminares foram baseados na modalidade de ISF denominada SPIF, ou seja, movimentação em  $Z$  e o *blank*, sem apoio na sua face inferior, movimentando-se nas direções  $XY$ . Os procedimentos de estampagem com a ferramenta. Variando-se o passo vertical  $\Delta z$ , o objetivo principal desse Ensaio é observar o comportamento dos Sensores S1 e S3 quando em tração e compressão. Os parâmetros usados nos experimentos foram:

- Raio da Ponta da Ferramenta  $R_T$ : 7,5 mm
- Passo Vertical  $\Delta z$ : 0,1 mm
- Velocidade de Avanço  $V_{fh}$  em  $XY$ : 1000 mm/min
- Velocidade de mergulho  $V_z$  em  $Z$ : 1000 mm/min
- Velocidade de rotação da Ferramenta  $V_C$ : 0 rpm
- Espessura da Chapa: 0,5mm

Todos os ensaios executados foram até ao rompimento da chapa. A chapa utilizada para todos os ensaios foi de  $s_0 = 0,5\text{mm}$ . Na Figura 36a, observa-se uma vista superior da chapa estampada, onde observa-se o processo de estampagem onde houve o contato da ferramenta, fazendo um “valo”, e na Figura 36b, onde na vista frontal é possível observar o “valo” em conjunto com o ponto de fratura.

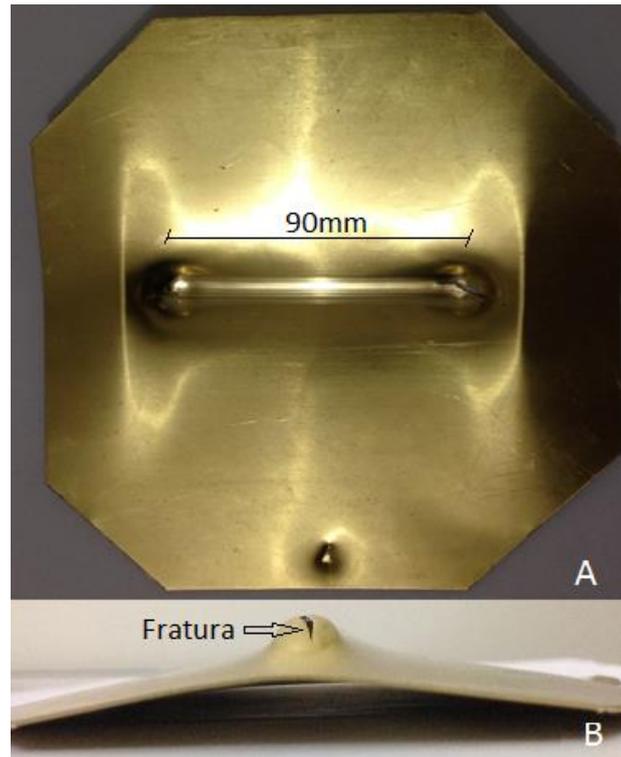


Figura 36 – Ensaio preliminar 04 com chapa de 0.5mm, observando-se os dados de compressão para o Sensor S3. A) Vista Superior e B) Vista Frontal.

Nos ensaios executados nos testes preliminares observou-se o rompimento em aproximadamente  $\Delta z = 4,3\text{mm}$ . Efetuou-se a conformação em formato de linha reta de aproximadamente 90mm de comprimento, a cada passe incrementou-se em  $\Delta z = 0,1\text{mm}$  no momento B, conforme observa-se na Figura 37, ou seja, na entrada da ferramenta para execução da ISF.



Figura 37 – Chapa sendo estampada observando-se os pontos definidos na leitura do sinal.

Na Figura 38 apresenta-se os dados lidos pelo Sensor S1, observa-se pelos dados completos de sinal, um comportamento diferente em tração (Figura 38a) e compressão (Figura

38b). Isso se relaciona com a geometria da ferramenta, a confecção dos rebaixos no corpo cilíndrico faz com que o comportamento em tração e compressão sejam diferentes.

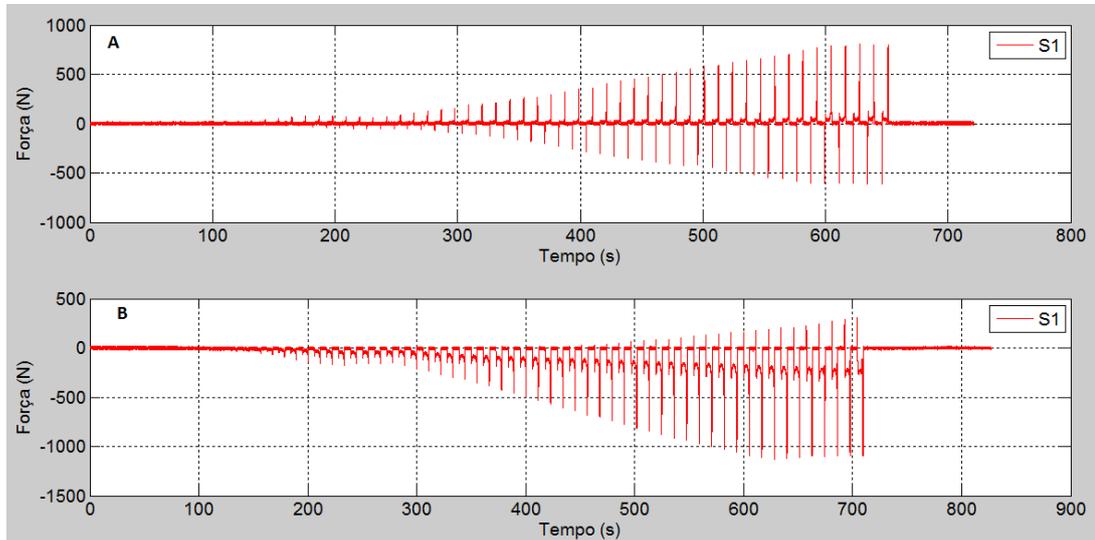


Figura 38 – Dados obtidos para o Sensor S1 em experimento preliminar. A) Tração e B) Compressão.

A Figura 39 apresenta os dados obtidos pelo Sensor S3, onde tem-se o mesmo comportamento observado durante as medições do Sensor S1. Para a tração tem-se a Figura 39a, para a compressão tem-se a Figura 39b. Pode-se observar que as deformações relativas no Sensor S3 são maiores que no Sensor S1, corroborando com o conceito do Momento Fletor onde, na “ponta” da ferramenta a deformação relativa que ocorre é menor que a deformação relativa que ocorre no “meio” da mesma. Observou-se pelas Figura 34 e Figura 35 da simulação numérica que o comportamento das tensões se repete sendo maiores no “meio” da ferramenta do que na “ponta”.

A Figura 40 contém o detalhamento do Sensor S3, a partir da imagem pode-se observar um ciclo completo executado no teste preliminar, da mesma maneira como apresentado na Figura 37. Em A, a ferramenta não possui contato junto a chapa sendo estampada. Este processo inicia-se no ponto B, quando a ferramenta sofre uma flexão inicial, a força estabiliza ponto C, ao longo da trajetória de ISF na chapa. Quando deslocado no ponto D, ou seja, na saída da ISF, nota-se um pico de força bastante elevado, este comportamento é devido a força que a chapa faz contrária a ferramenta quando a mesma retira o contato com a chapa.

O procedimento experimental preliminar comprova que na prática está ocorrendo comportamentos diferentes em tração e compressão, isso se deve principalmente devido a confecção dos rebaixos no corpo da ferramenta.

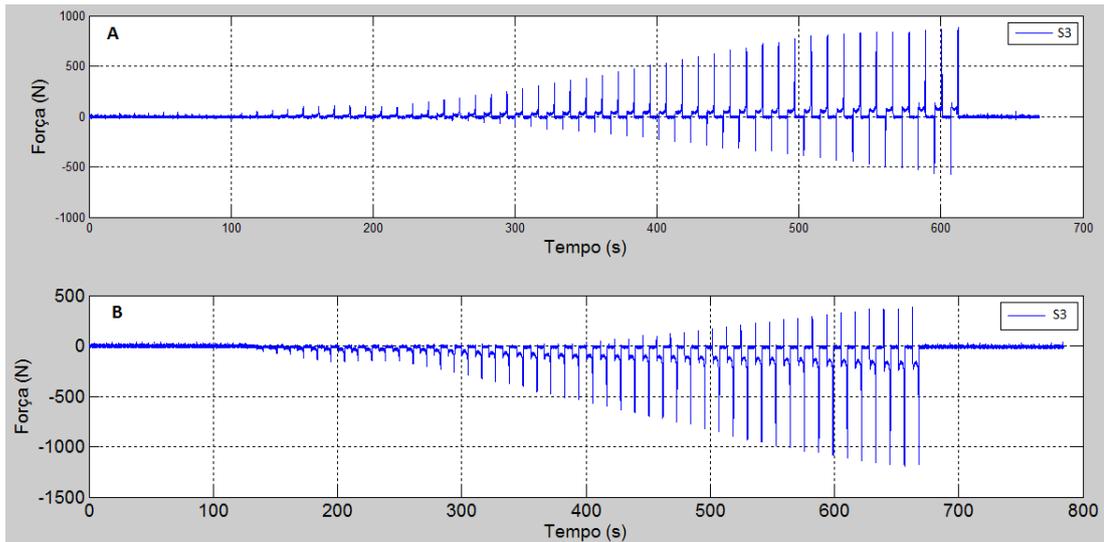


Figura 39 – Dados obtidos para o Sensor S3 em experimento preliminar. A) Tração e B) Compressão.

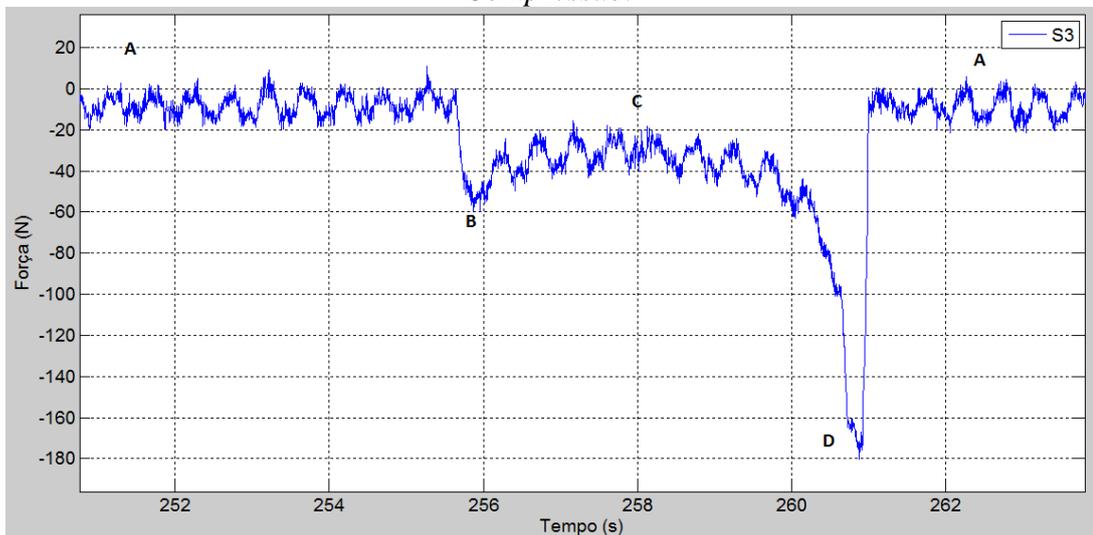


Figura 40 – Sinal obtido a partir de ensaio preliminar com chapa de  $s_0 = 0,5\text{mm}$  comportamento do Sensor S3 em estado de compressão.

### 3.10. Análise Experimental - Estampagem Incremental (ISF)

A ISF foi executada em um Centro de Usinagem Vertical Discovery 600, fabricado pela Romi. Para o projeto deste *blank* foi utilizado o software CAD SolidWorks 2010<sup>®</sup>, como pode-se observar na Figura 41a, e no software EdgeCAM<sup>®</sup> foi elaborado o programa CNC utilizado na ISF (Figura 41b). A estratégia adotada foi a helicoidal.

Tabela 5 apresenta as características técnicas de operação do equipamento. Contendo softwares CAD/CAM como forma de comunicação com o Centro de Usinagem.

Para o projeto deste *blank* foi utilizado o software CAD SolidWorks 2010®, como pode-se observar na Figura 41a, e no software EdgeCAM® foi elaborado o programa CNC utilizado na ISF (Figura 41b). A estratégia adotada foi a helicoidal.

Tabela 5 – Características Técnicas do Centro de Usinagem usado nos experimentos.

Potência	30kVA
Potência do Motor Principal	20/15 (regime 15 min)
Comando CNC	GE Fanuc 0i-MC
Cone da Árvore	ISO 40
Dimensões da Mesa	840,00 x 500,00
Curso longitudinal (Eixo X)	600,00 mm
Curso Transversal (Eixo Y)	530,00 mm
Curso Vertical (Eixo Z)	580,00 mm
Avanço Rápido dos Eixos X, Y e Z	30 m/min

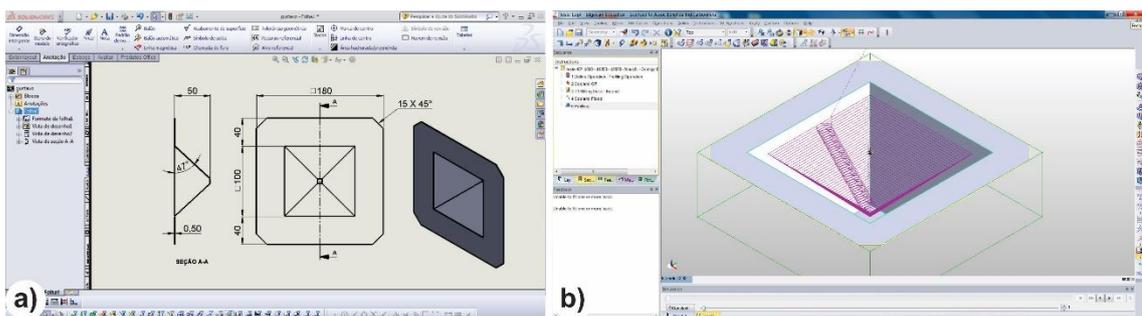


Figura 41 – a) Projeto do Blank, b) Simulação da ISF.

Foram feitos ao total 09 (nove) ensaios de estampagem com a ferramenta. Variando-se o ângulo de parede ( $\psi$ ) e a espessura da chapa ( $S_0$ ). Os parâmetros fixos usados no experimento foram:

- Raio da Ponta da Ferramenta  $R_T$ : 7,5 mm
- Passo Vertical  $\Delta Z$ : 0,1 mm
- Velocidade de Avanço  $V_{fh}$  em XY: 3000 mm/min
- Velocidade de mergulho  $V_z$  em Z: 1000 mm/min
- Velocidade de rotação da Ferramenta  $V_C$ : 0 rpm

Pode-se observar na Tabela 6, todos os parâmetros usados em cada Ensaio de estampagem.

Tabela 6 – Parâmetros usados nos experimentos de ISF.

<i>Ensaio</i>	<i>Raio (R<sub>T</sub>) [mm]</i>	<i>Passo Vertical (Δz) [mm]</i>	<i>Velocidade de Avanço V<sub>fh</sub> [mm/min]</i>	<i>Velocidade de Mergulho V<sub>Z</sub> [mm/min]</i>	<i>Velocidade de Rotação V<sub>z</sub> [rpm]</i>	<i>Ângulo de Parede (ψ°)</i>	<i>Espessura da Chapa [mm]</i>
1	7,5	0,1	3000	1000	0	58	0.5
2	7,5	0,1	3000	1000	0	59	0.5
3	7,5	0,1	3000	1000	0	57	0.5
4	7,5	0,1	3000	1000	0	57	0.7
5	7,5	0,1	3000	1000	0	57	1
6	7,5	0,1	3000	1000	0	58	0.7
7	7,5	0,1	3000	1000	0	58	1
8	7,5	0,1	3000	1000	0	59	0.7
9	7,5	0,1	3000	1000	0	59	1

Pode-se observar pela Figura 42, a visão inferior de todos os Ensaios executados, verificando-se o Ensaio número 02, onde houve o rompimento da chapa.

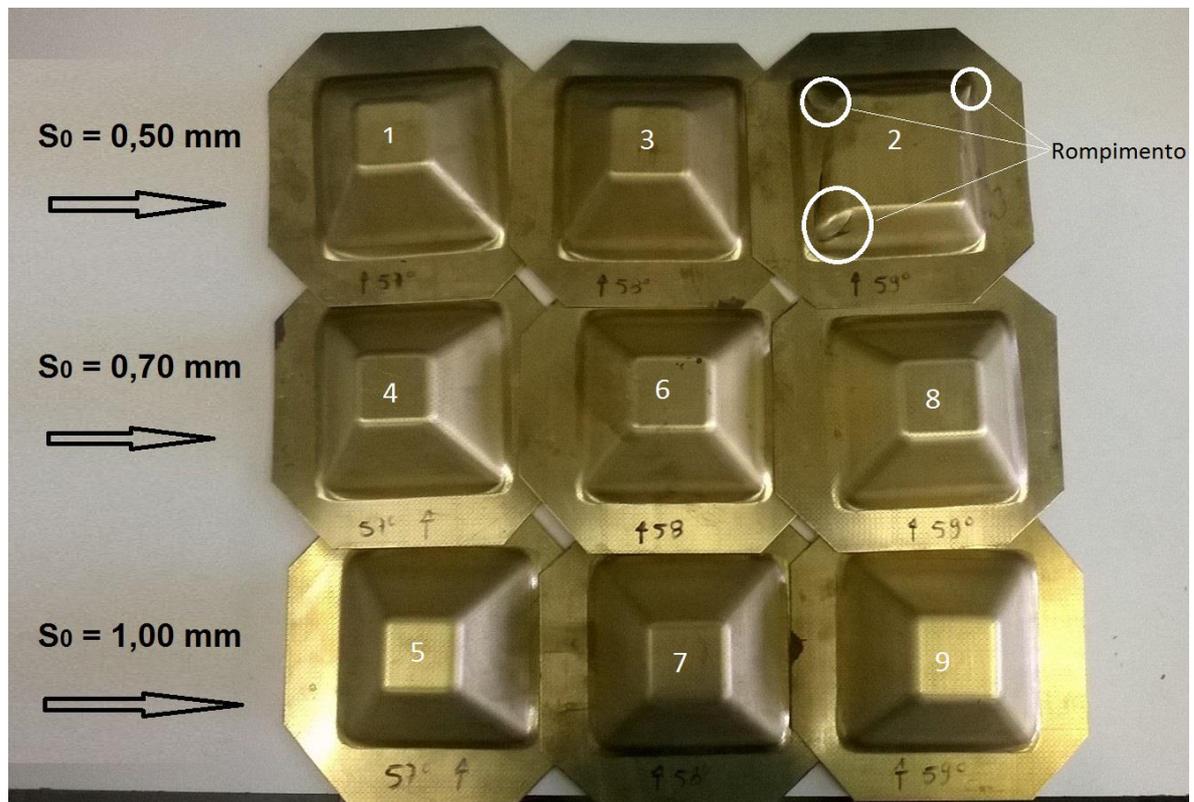


Figura 42 – Visão inferior dos Ensaios executados.

Novamente se preocupou com a temperatura durante os experimentos, desta forma, os dados de temperatura foram coletados como forma de avaliação da influência desta em todo o processo. Na Figura 43 apresentamos imagens termográficas obtidas durante o processo de ISF sendo a Figura 43A no final do ensaio 01 com detalhe para o Sensor S3, e a Figura 43B no final do ensaio 04 com detalhe para o Sensor S1, pode-se observar o comportamento da temperatura

na ferramenta ao final do processo de ISF, observa-se ainda um comportamento da ponta da ferramenta estão mais quente do que onde os Sensores estão posicionados.

Na Figura 44 pode-se observar os dados de temperaturas observados durante a ISF, apresenta-se os dados médios com uma medição no início do processo, uma durante a estampagem e uma imagem termográfica ao final do processo.

Devido a variação de temperatura ser menor do que os valores recomendados na Tabela 2, não foi considerada uma variação significativa durante a calibração e nos experimentos de ISF. O valor máximo obtido foi de  $\Delta T = 4,50\text{ }^{\circ}\text{C}$  para o Ensaio 06, com chapa de  $s_0 = 0,7\text{mm}$  com a ISF sendo executada a um ângulo de parede de  $\psi = 59^{\circ}$ . Sendo o valor mínimo de variação a ser recomendado pelo fabricante de um  $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ . Portanto para os experimentos de calibração e ISF as temperaturas não foram consideradas como possibilidade de influenciar o resultado.

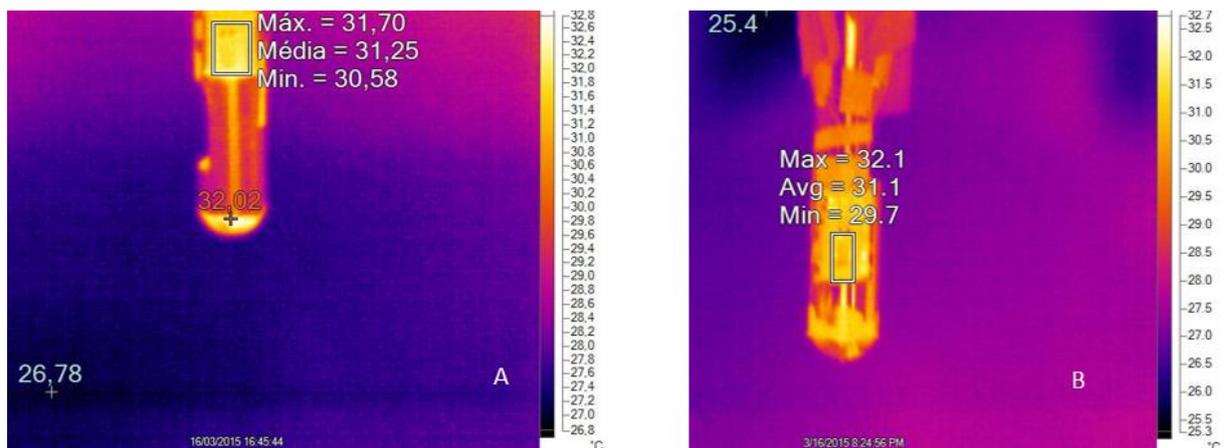


Figura 43 – Imagens termográficas ISF. A) Detalhe Sensor S3 Ensaio 01. B) Detalhe Sensor S1 Ensaio 04.

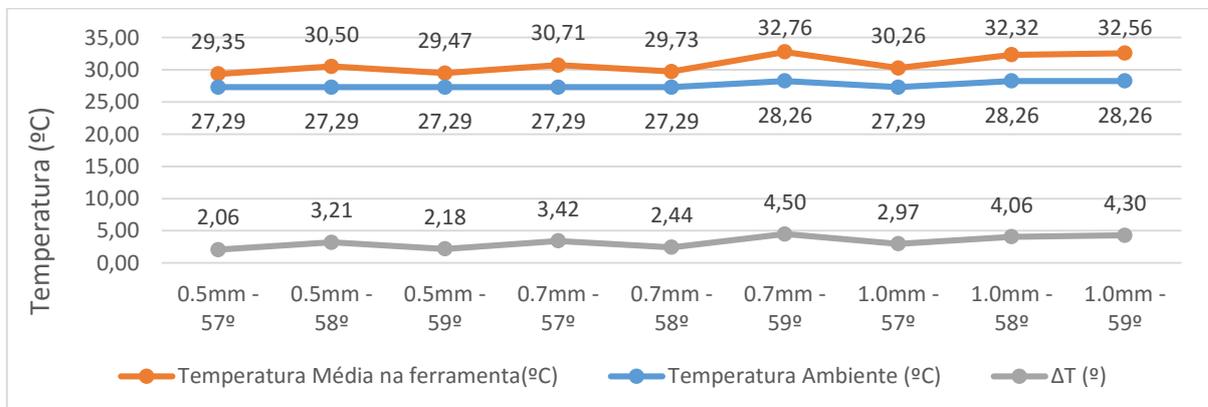


Figura 44 – Variação da Temperatura ( $\Delta T$  °C) no corpo da ferramenta durante processo de ISF.

Nas pesquisas de estado da arte em áreas como a ISF e Extensometria, não foi possível localizar alguma referência que fosse possível efetuar a comparação com o método de calibração utilizado nesse estudo. Desta maneira, optou-se por duas formas de comparação para este método. Sendo destacado uma primeira comparação o Cálculo Analítico do processo, e posteriormente comparando-se com os resultados apresentado por meio de Simulação Numérica.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo permitiu avaliar as forças em relação aos eixos X e Y, com o Sensor S1, sendo utilizado para verificação das forças em relação a eixo X, e o Sensor S3, sendo possível verificar as forças atuantes na ferramenta em relação ao eixo Y, ambos em tração e compressão.

Na Figura 45 apresenta um croqui das forças bem como início do processo de ISF, iniciando em  $F_y$  (tração), até o momento final da confecção da chapa estampada. A partir da Figura 45 pode-se observar as forças em atuação. Na Figura 46 apresenta-se o resultado da leitura do sinal do ensaio 01, onde a chapa possui uma espessura de  $s_0 = 0.5\text{mm}$  com um ângulo de parede  $\Psi = 58^\circ$ . Pode-se observar a indicações da Forças em relação aos eixos lidos pelos Sensores S1 e S3. O comportamento das forças em cada momento em que a ferramenta esta sofrendo o estado de flexão.

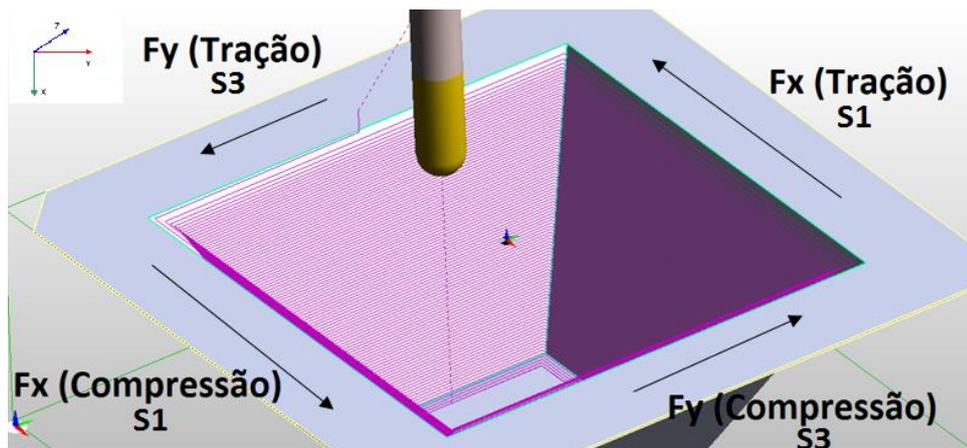


Figura 45 – Croqui dos sentidos das forças de Estampagem.

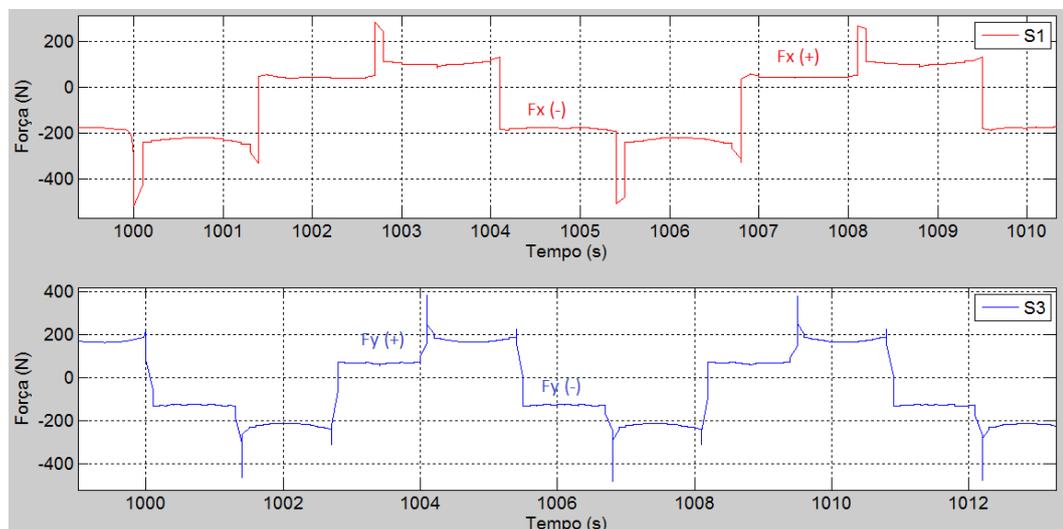


Figura 46 – Detalhe do sinal adquirido para os Sensores S1 e S3 no Ensaio 01 sendo a chapa com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com  $\Psi = 58^\circ$ .

Na Figura 47 observa-se os dados dos Sensores S1 e S3 para o ensaio 01, constata-se uma força no eixo X de  $F_x$  (tração)  $\cong 50\text{N}$ , e  $F_x$  (compressão)  $\cong -180\text{N}$ . Já para os dados de força no eixo Y de  $F_y$  (tração)  $\cong 65\text{N}$ , enquanto que para  $F_y$  (compressão)  $\cong -130\text{N}$ .

A partir da análise efetuada dos sinais, extraiu-se os dados das forças em relação aos eixos X e Y para o Ensaio 01 onde a chapa possui espessura  $s_0 = 0,5\text{mm}$ , com ângulo de parede de  $\Psi = 58^\circ$ , apresenta-se então os dados processados para o Ensaio 01 na Figura 47.

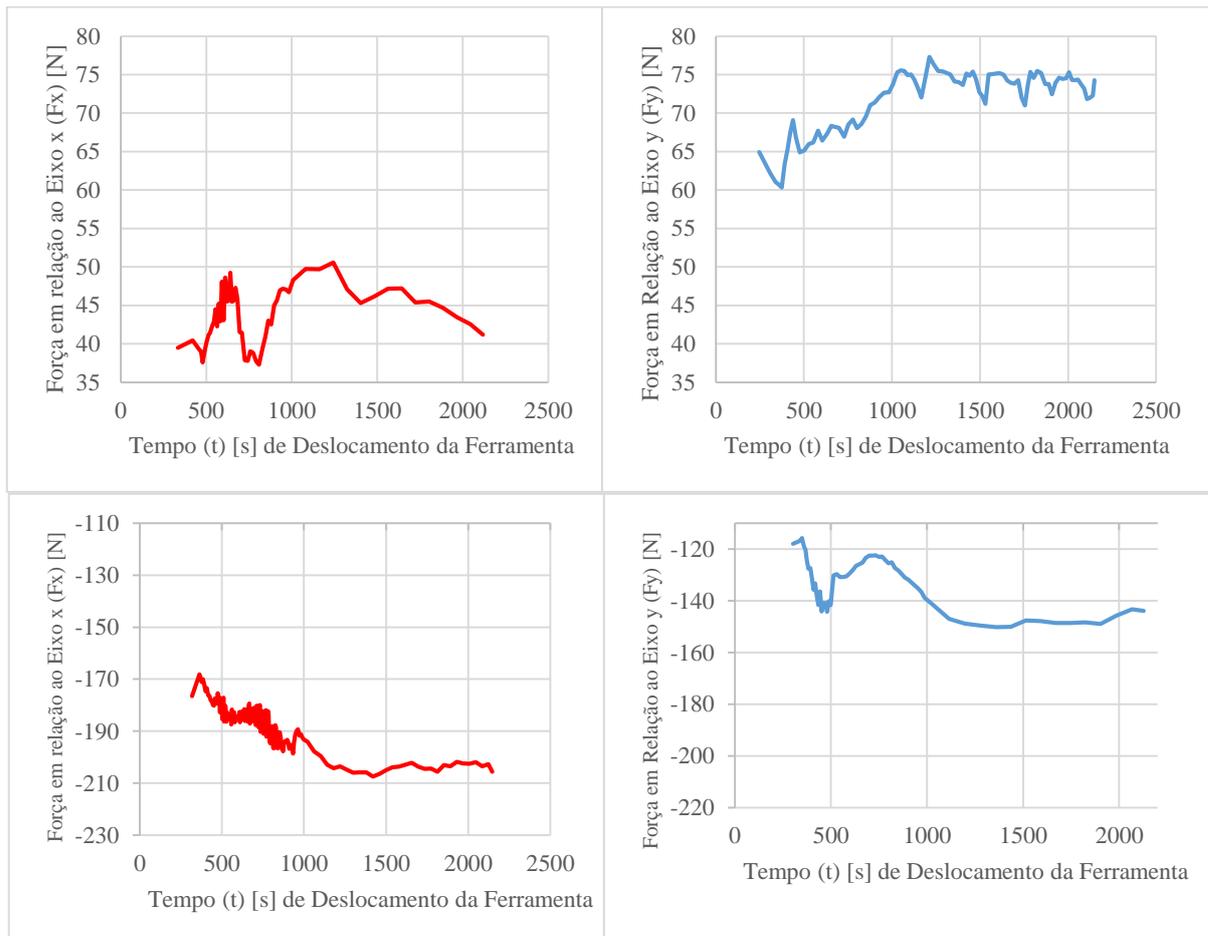


Figura 47 – Forças (N) nos eixos X e Y para o Ensaio 01 com chapa de espessura  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com ângulo de parede de  $\Psi = 58^\circ$ .

No Ensaio 02, houve um rompimento da chapa, o ângulo de parede utilizado foi de  $\Psi = 59^\circ$ , em uma chapa com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  de espessura. Pelos dados apresentados na Figura 48, demonstra-se que a força, seja ela em relação ao eixo X e Y, após o rompimento se estabiliza, não sofrendo grandes mudanças até o final do processo. Para este caso não se efetuou o tratamento do sinal para medição das forças isoladamente, devido a ser incongruentes os dados das forças medidas após o rompimento. Ele não será utilizado como dado para a sequência do estudo.

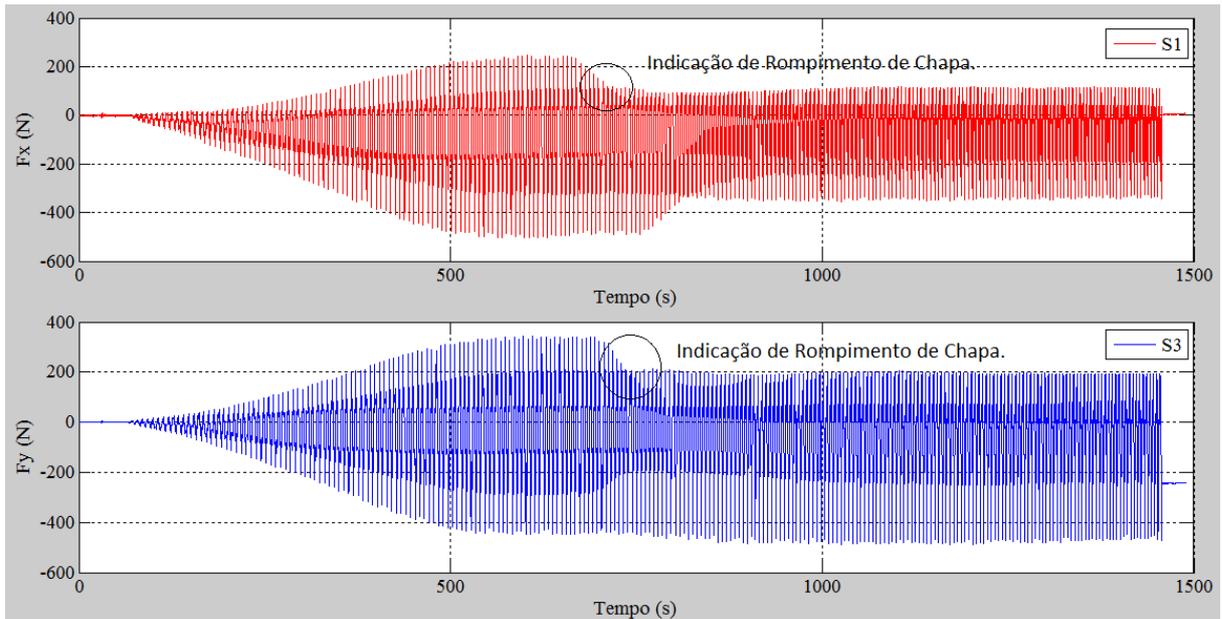
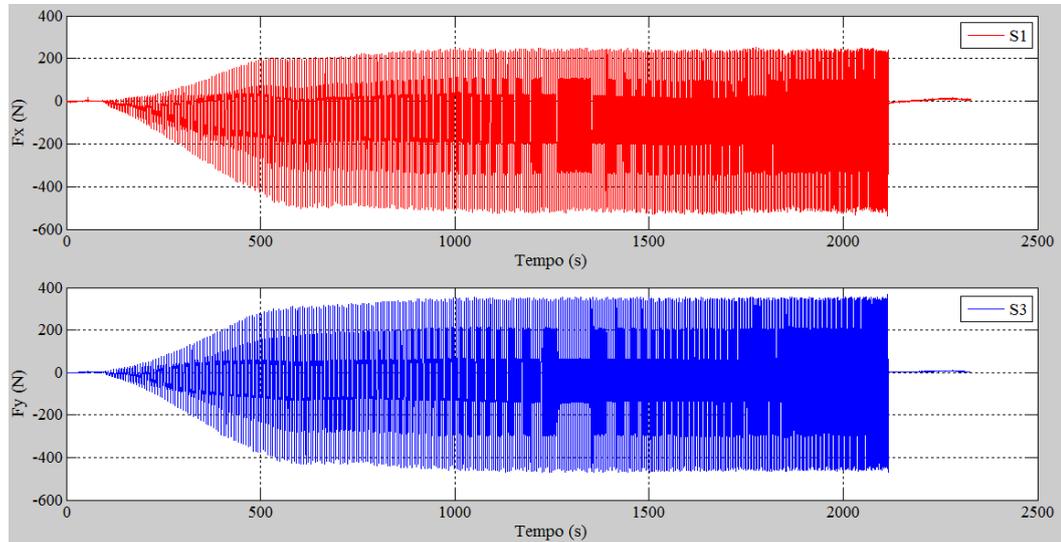


Figura 48 – Sinal completo medido do Ensaio 02, chapa com espessura de  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com ângulo de parede de  $\Psi = 59^\circ$ .

Quando comparado o resultado apresentado pelo Ensaio número 02, Figura 48, com o resultado apresentado pelas leituras no Ensaio número 03, Figura 49, observa-se o comportamento das forças após o rompimento ocorrido, ao mesmo tempo no Ensaio 03 o sistema efetua as leituras dos picos de forma linear. Isso demonstra que após o rompimento da chapa no Ensaio 02, houve uma diminuição da força tanto no eixo X, quanto no eixo Y, já que os dois valores foram diminuindo no decorrer do processo de ISF. Efetuou-se a parada do Ensaio 02 antes que a chapa rompesse. As chapas que obtiveram um comportamento normal de ISF, ou seja, sem rompimento, foram executadas até  $\Delta z = 50\text{mm}$ .

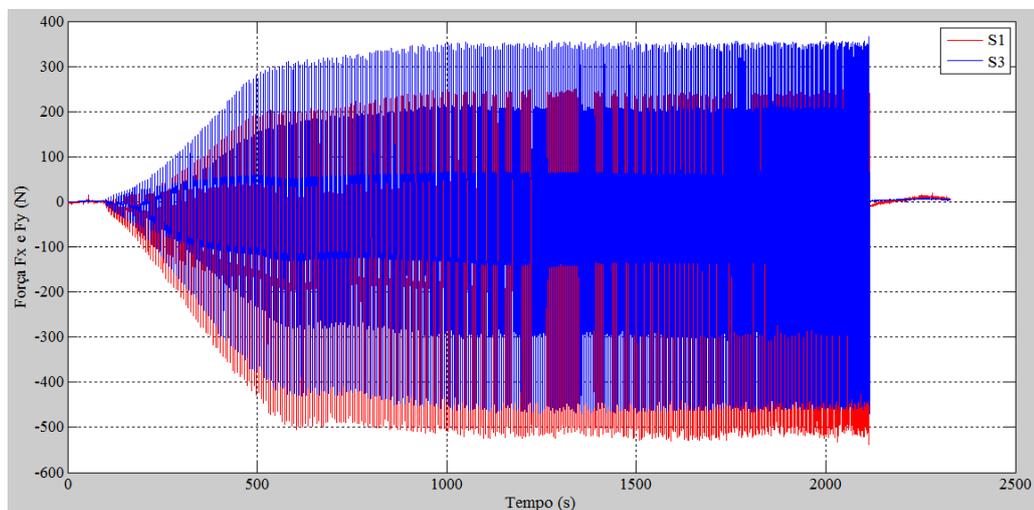
Na Figura 49, observa-se uma amplitude de forças desde 200N até -500N para o Sensor S1, enquanto que para o Sensor S3, observa-se uma amplitude de forças de quase 400N até -450N. Isso se observa em todos os Ensaios os quais tiveram um comportamento sem ruptura. Essa amplitude acima das demonstradas nos Gráficos, como por exemplo, da Figura 47, deve-se ao fato de nas curvas executadas pela ferramenta no processo, ou seja, na transição do eixo Y para o X, e vice-versa, ocorrem picos de forças nos sensores. Esses dados foram desprezados nessa etapa do estudo, devido a ocorrer nitidamente um estado multiaxial de forças nesses pontos. Desta maneira, as imagens que demonstram o sinal completo, ou seja, sem a extração dos dados somente em Fx e Fy, observa-se uma amplitude maior que as forças apresentadas quando observadas individualmente. Destaca-se novamente a Figura 46, com detalhe do sinais, onde pode-se observar os picos das forças, nas curvas onde há a transição dos eixos. Apresenta-

se nos Apêndices B ao H, as leituras de sinais completas e processadas no Matlab<sup>®</sup>, para os Ensaios 01, 04, 05, 06, 07, 08, 09 e 10, os quais não estão no corpo do texto.



*Figura 49 – Sinal completo adquirido no Ensaio 03 com comportamento normal de leitura das forças, chapa com espessura  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$ .*

Como forma de comparação dos resultados das amplitudes das forças durante todo o processo de ISF, apresenta-se a Figura 50, a qual demonstra as forças para o Ensaio 03, sendo sobrepostas forças em relação ao eixo X e forças em relação ao eixo Y, mesmo considerando os picos nas trocas de eixos. Observa-se que para o Sensor S1 existe uma força maior em compressão, e para o Sensor S3 uma força maior em tração, comportamento que se repete em todos os Ensaios executados, com exceção do Ensaio 02, o qual a chapa rompeu. Isso se deve principalmente ao acúmulo das tensões da geometria da chapa a ser estampada.



*Figura 50 – Forças  $F_x$  (N) e  $F_y$  (N) sobrepostas como forma de validação de amplitudes para Ensaio 03.*

Foram adicionados aos Apêndices B ao H, as imagens dos sinais sobrepostos afim de avaliar o comportamento das forças máximas durante todo o processo de ISF comparando-se os dados lidos pelos Sensores 1 e 3, sendo os sinais na cor vermelha e azul respectivamente.

#### 4.1. Resultado *Incremental Sheet Forming* para $s_0 = 0,5\text{mm}$

Para as chapas com espessura de  $s_0 = 0,5\text{mm}$ , tem-se dois Ensaios sem ruptura. Comparando-se as forças, observa-se na Figura 51, as correspondências de forças medidas variando-se  $\Psi = 1^\circ$  no ângulo de parede. Pode-se observar que as forças de tração para  $\Psi = 58^\circ$  possuem uma amplitude de  $F_y = 150\text{N}$  a  $F_y = 200\text{N}$  e entre  $F_y = 50\text{N}$  e  $F_y = 100\text{N}$  para o  $\Psi = 57^\circ$ . Já para compressão em relação ao eixo Y, as forças possuem comportamento similar estando em aproximadamente  $F_y = -120\text{N}$  no início do processo, e finalizando em  $F_y = -140\text{N}$  para um  $\Psi = 58^\circ$  e de aproximadamente  $F_y = -145\text{N}$  para  $\Psi = 57^\circ$ .

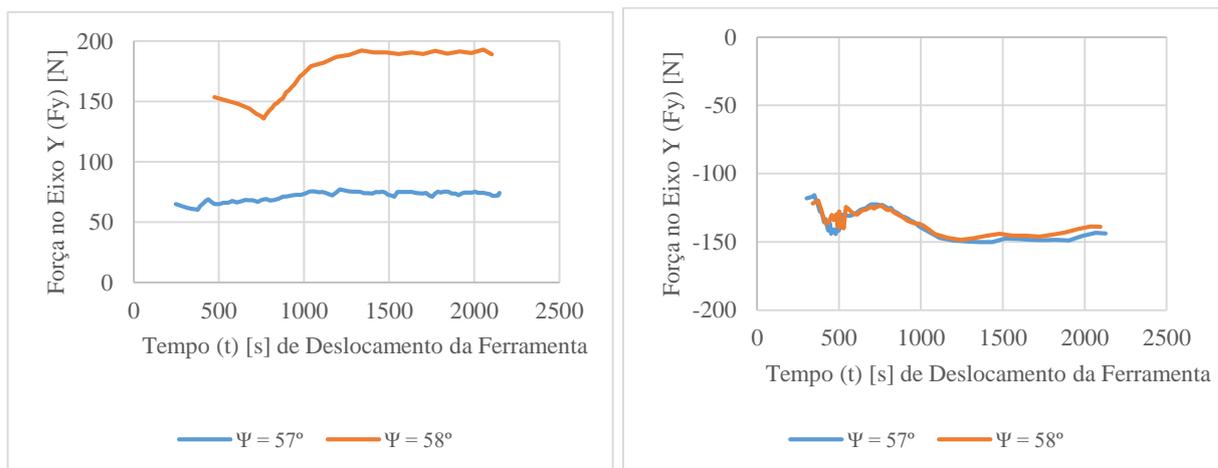


Figura 51 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$  e  $\Psi = 58^\circ$ .

Apresenta-se na Figura 52 os valores das forças de tração em relação ao eixo X para os Ensaios com chapas de  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com ângulo de parede de  $\Psi = 57^\circ$  e  $\Psi = 58^\circ$ . Observa-se que em tração as forças ficaram em entre  $F_x = 15\text{N}$  e  $F_x = 35\text{N}$  para o ângulo de parede de  $\Psi = 58^\circ$ , e para o ângulo de parede de  $\Psi = 57^\circ$  ficaram entre  $F_x = 35\text{N}$  e  $F_x = 55\text{N}$ . Demonstra-se também os resultados das forças de compressão em relação ao eixo X, onde tem-se uma amplitude maior de forças para o ângulo de  $\Psi = 58^\circ$  sendo aproximadamente  $F_x = -140\text{N}$  no início da ISF e aproximadamente  $-210\text{N}$  no término do processo, enquanto para o ângulo de  $\Psi = 57^\circ$ , tem-se o processo iniciando em aproximadamente  $F_x = -175\text{N}$  e finalizando em aproximadamente  $F_x = -210\text{N}$ .

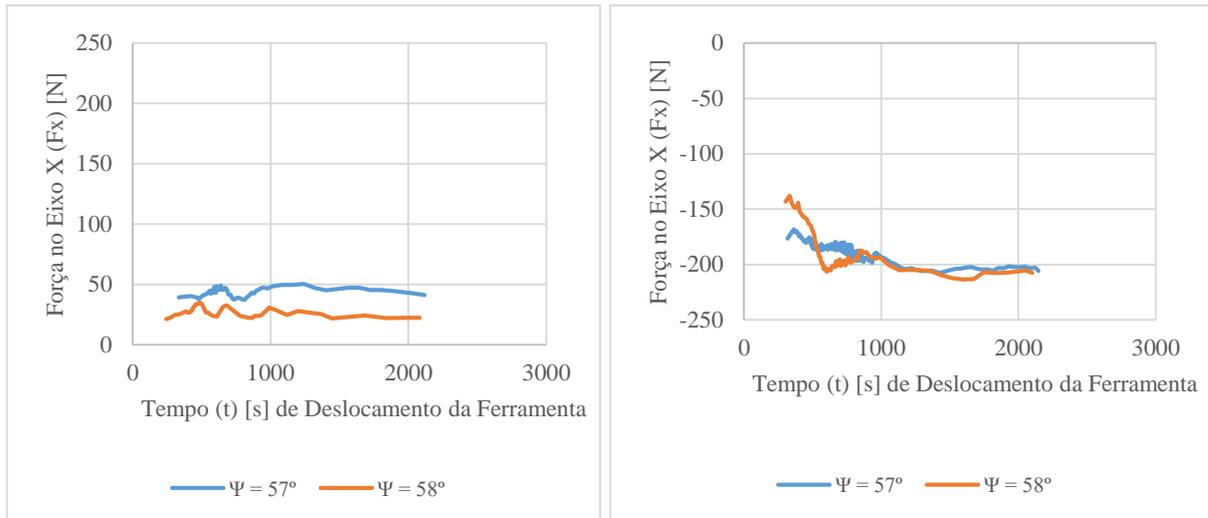


Figura 52 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$  e  $\Psi = 58^\circ$ .

Destaca-se a partir da análise das forças uma variação bastante grande quando observado os dados de tração no eixo Y em relação ao eixo X na ordem de mais de 100N quando com o ângulo de parede de  $\Psi = 58^\circ$ . Isso é importante mostra/compara o comportamento das forças durante a ISF.

Com o ângulo de  $\Psi = 57^\circ$  o comportamento da força de tração quando se compara o eixo Y com o eixo X, praticamente não se alteram. O que não se repete na compressão, onde pode-se observar que existe uma diferença entre os dois ângulos de parede, ou seja, alterando apenas  $\Psi = 1^\circ$  de ângulo de parede, submete a ferramenta a praticamente o dobro da força de compressão.

#### 4.2. Resultado *Incremental Sheet Forming* para $s_0 = 0,7\text{mm}$

Os Ensaios 04, 06 e 08 destacam a ISF para chapas de  $s_0 = 0,7\text{mm}$  com ângulos de parede de ( $\Psi$ ),  $57^\circ$ ,  $58^\circ$  e  $59^\circ$ . Quando observado a Figura 53, os dados de força em relação ao eixo Y, observa-se que em tração as forças foram relativamente equiparadas, não tendo mudanças bruscas no processo de estampagem. Já para as forças de compressão, observa-se uma leve diferença para a chapa com ângulo de parede de  $\Psi = 57^\circ$  no início do processo, que se estabiliza junto as outras forças no decorrer da estampagem.

Observa-se ainda que em tração teve-se uma amplitude de aproximadamente  $F_y = 80\text{N}$  para o início do processo e ao final atingindo quase o dobro disso sendo próximo a  $F_y = 150\text{N}$ . Para a compressão a amplitude ocorreu de forma a iniciar em aproximadamente  $F_y = -180\text{N}$ , finalizando a estampagem próximo a  $F_y = -250\text{N}$ .

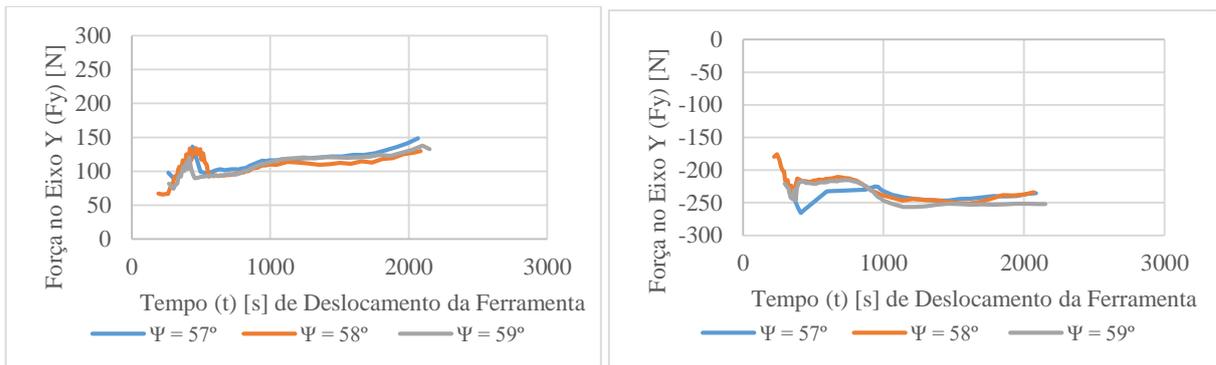


Figura 53 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 0,7\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$ ,  $\Psi = 58^\circ$  e  $\Psi = 59^\circ$ .

Na Figura 54, tem-se as forças em relação ao eixo X em tração e compressão. A amplitude para a tração ficou de  $F_x = 30\text{N}$  até  $F_x = 60\text{N}$ . Destacando-se que para o ângulo de  $\Psi = 57^\circ$ , a força no início do processo foi maior que os outros ângulos, o que não ocorre quando se compara os dados de  $\Psi = 59^\circ$  com relação a  $\Psi = 58^\circ$ . Já para os dados de compressão, destaca-se uma linearidade do resultado das forças, variando de  $F_x = -270\text{N}$  até no máximo  $F_x = -350\text{N}$ .

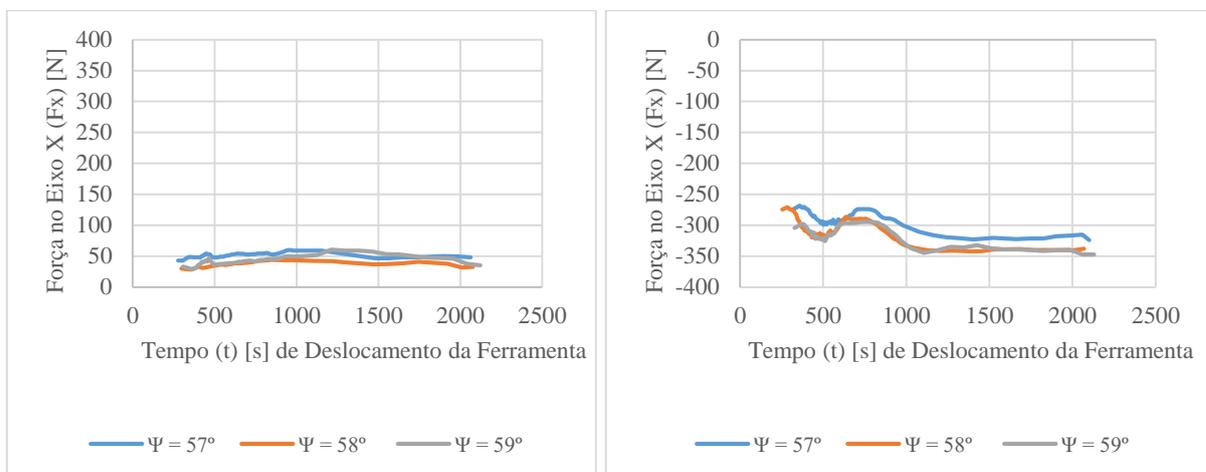


Figura 54 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 0,7\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$ ,  $\Psi = 58^\circ$  e  $\Psi = 59^\circ$ .

Comparando-se os resultados apresentados pelos 3 (três) Ensaios realizados com as chapas de  $s_0 = 0,7\text{mm}$ , observa-se que no eixo Y as forças medidas em tração tiveram aproximadamente o dobro de força necessária com relação ao eixo X. Enquanto que para compressão as forças finais de estampagem para  $F_y = -260\text{N}$  e iniciaram em relação ao eixo X em  $F_x = -270\text{N}$ .

### 4.3. Resultado *Incremental Sheet Forming* para $s_0 = 1,0\text{mm}$

Os Ensaio 05, 07 e 09 destacam a ISF para as chapas de  $s_0 = 1\text{mm}$ , com os ângulos de parede ( $\Psi$ ) de  $57^\circ$ ,  $58^\circ$  e  $59^\circ$ . Para os dados apresentados em relação ao eixo Y, que pode ser observado na Figura 55, tem-se uma linearidade nos dois cenários, tanto em compressão, como em tração. Em tração com uma amplitude de aproximadamente  $F_y = 100\text{N}$  até  $F_y = 250\text{N}$ , e em compressão iniciando em  $F_y = -280\text{N}$  e finalizando o processo em aproximadamente  $F_y = -370\text{N}$ .

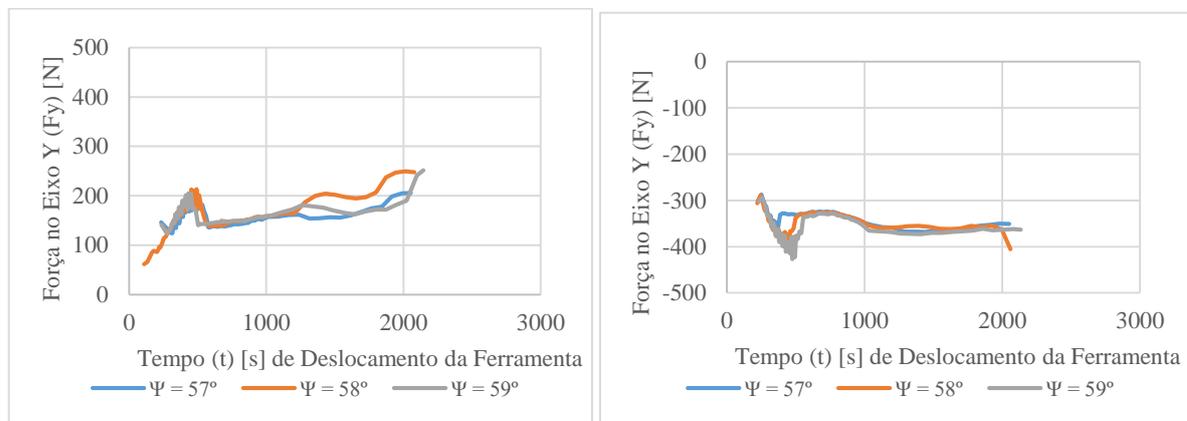


Figura 55 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 1,0\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$  e  $\Psi = 58^\circ$ .

Diferente das forças em relação ao eixo Y, quando se observa a Figura 56 os dados das forças de tração e compressão em relação ao eixo X, em chapas com  $s_0 = 1,0\text{mm}$ , os dados não apresentam uma linearidade, tendo uma amplitude em tração de aproximadamente  $F_x = 10\text{N}$  até  $F_x = 60\text{N}$ , enquanto que para a compressão, tem-se uma amplitude de  $F_x = -410\text{N}$  até  $F_x = -530\text{N}$ .

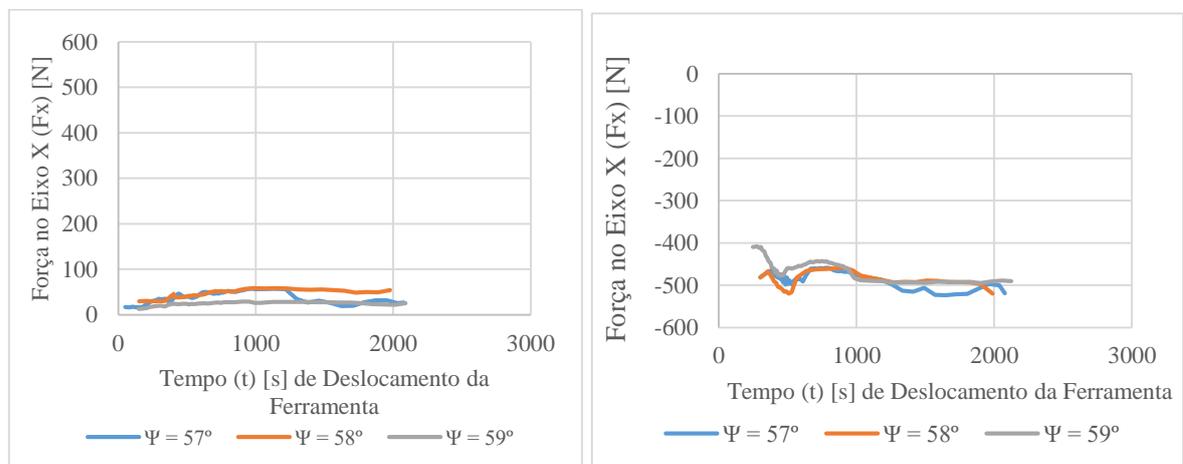


Figura 56 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 1,0\text{mm}$  com  $\Psi = 57^\circ$  e  $\Psi = 58^\circ$ .

Comparando-se as forças ocorridas no eixo X em relação ao Y, em tração nota-se uma diferença bastante grande, de mais de 100N, na compressão as forças se invertem, ou seja, a diferença na compressão é em relação ao eixo Y com o X.

#### 4.4. Resultado *Incremental Sheet Forming* para todos os Ensaios

Na Figura 57 tem-se a imagem da força no eixo Y para todos Ensaios executados. É possível observar que com o aumento da espessura da chapa, as forças em relação ao eixo Y ( $F_y$ ) são maiores. Já quando alterasse o ângulo de parede ( $\Psi$ ), as forças mantêm-se lineares. Somente para as chapas com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  houveram forças distintas. Pode-se atribuir essa discrepância ao fato de que a chapa do Ensaio 02 com  $\Psi = 59^\circ$  de ângulo de parede rompeu. Sendo, portanto, o ângulo de parede em  $58^\circ$  muito próximo da zona de ruptura, influenciando assim na resistência do material da chapa.

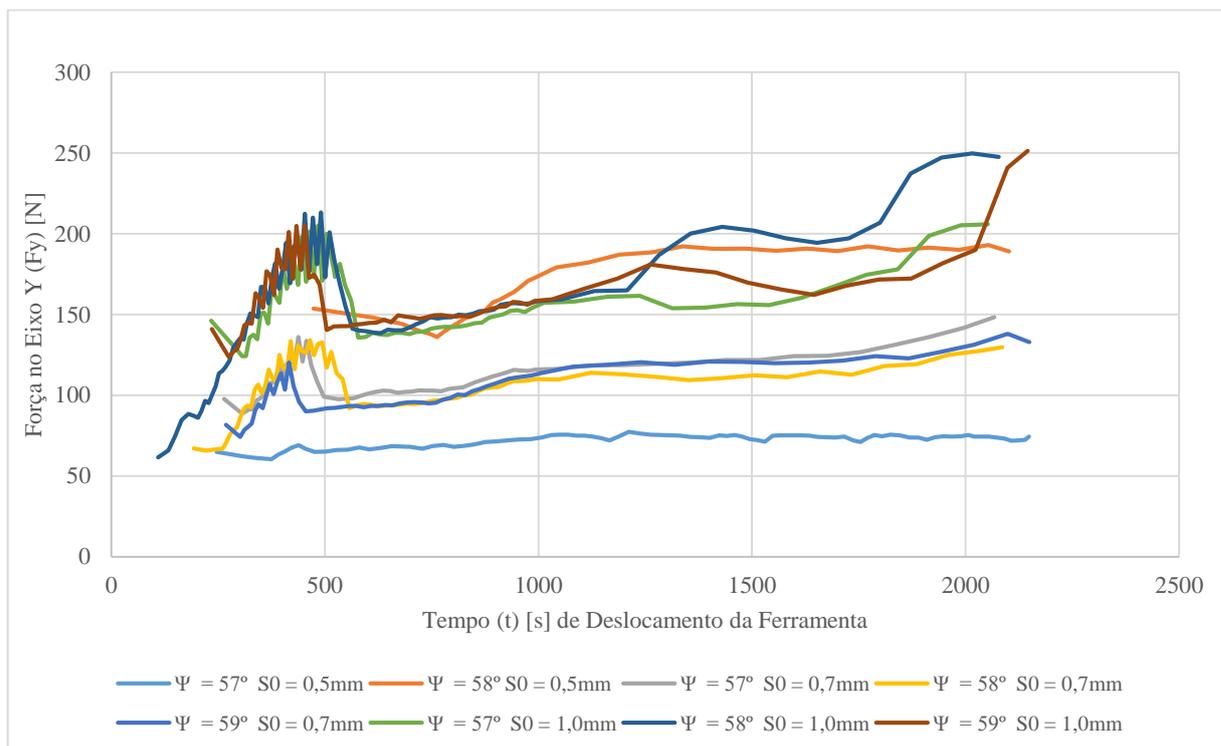


Figura 57 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] em tração para os 08 (oito) ensaios.

Apresenta-se as forças de estampagem no eixo Y em compressão na Figura 58. Na imagem é perceptível as diferenças das forças de acordo com a espessura da chapa ( $s_0$ ), indiferente do ângulo de parede ( $\Psi$ ).

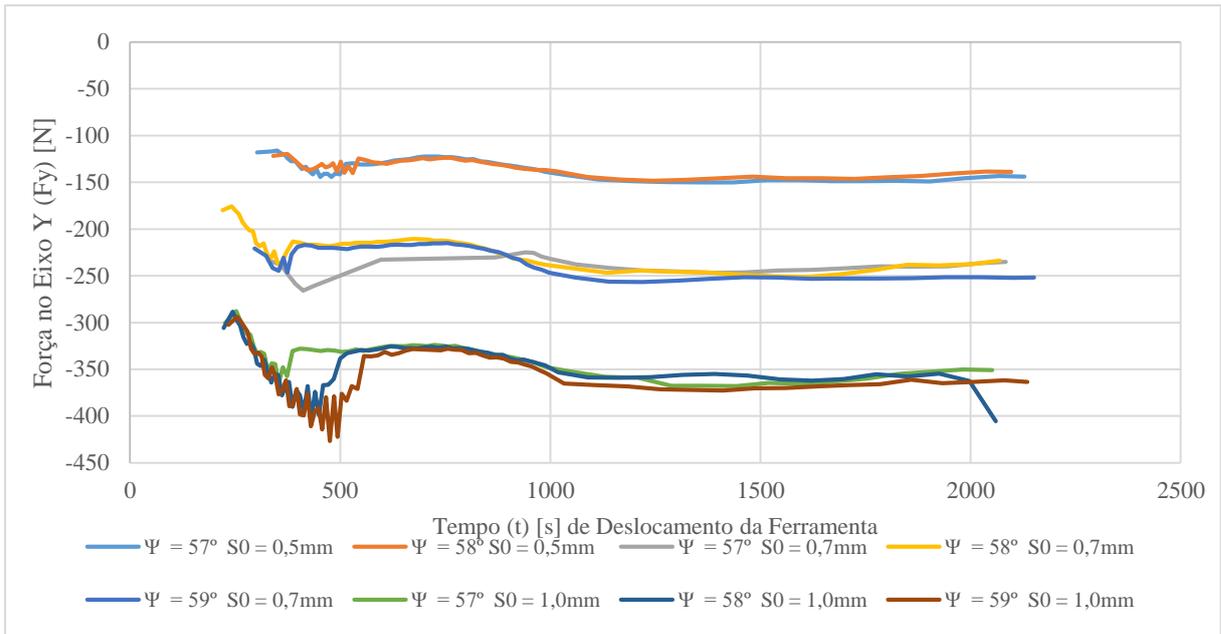


Figura 58 – Forças no Eixo Y ( $F_y$ ) [N] em compressão para os 08 ensaios.

A Figura 59 traz as forças em tração a partir do eixo X, neste caso observa-se novamente uma não linearidade das forças adquiridas, da mesma forma que em tração para o eixo Y. Observa-se pelos dados apresentados que as forças lidas no eixo X, quando em tração não possuem uma amplitude nítida para as três espessuras ( $s_0$ ) ensaiadas, e também não há discrepância quando alterasse o ângulo de parede ( $\Psi$ ).

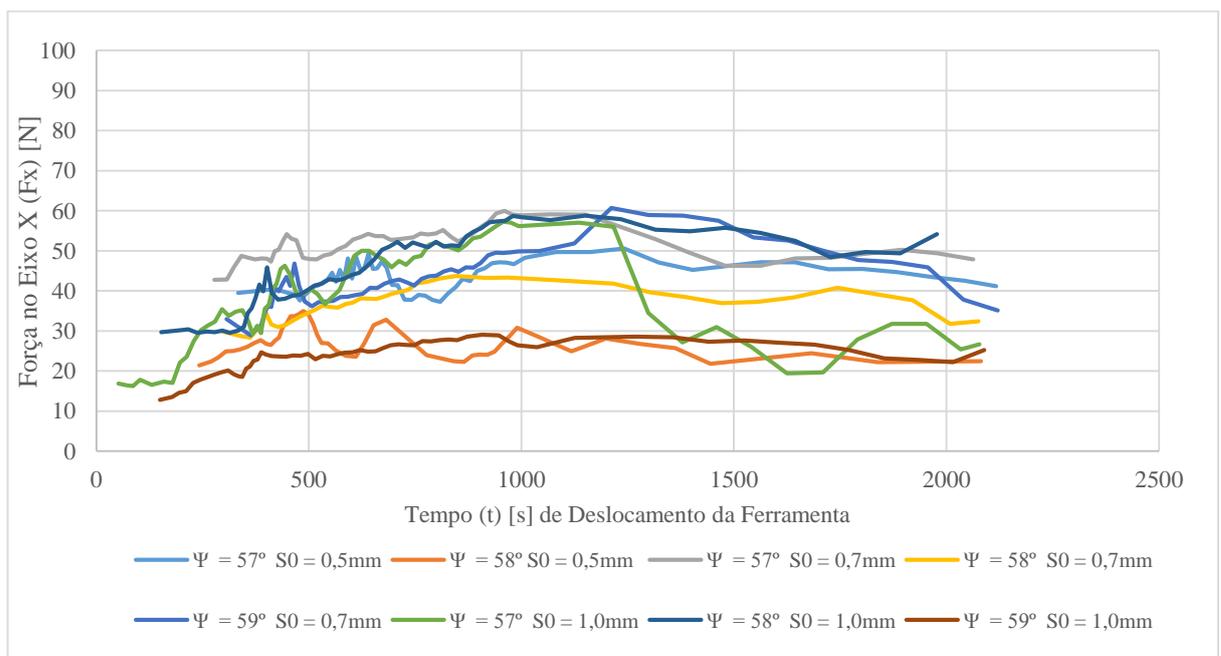


Figura 59 – Forças no Eixo X ( $F_x$ ) [N] em tração para os 08 ensaios.

Apresenta-se na Figura 60 as forças em compressão para o eixo X, onde observa-se novamente a linearidade apresentada também na compressão em relação ao eixo Y.

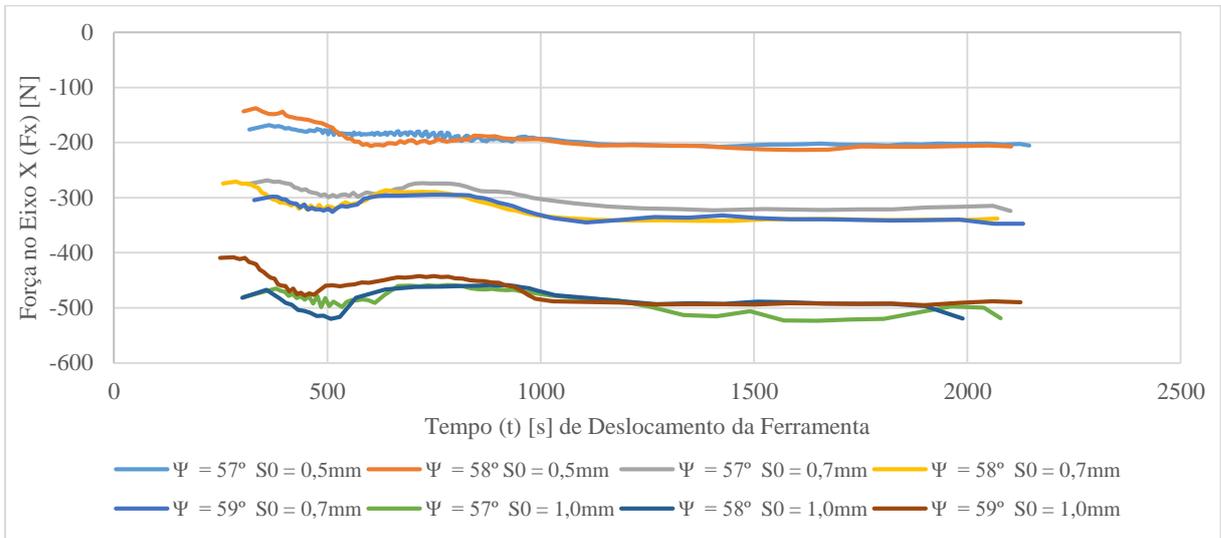


Figura 60 – Forças no Eixo X (Fx) [N] em compressão para os 08 Ensaios.

Como forma de comparação de dados, contabilizou-se as médias de forças para as chapas de mesma espessura, apresentando os resultados das Figura 61, Figura 62 e Figura 63. Sendo respectivamente para  $s_0 = 0,5\text{mm}$ ,  $s_0 = 0,7\text{mm}$  e  $s_0 = 1,0\text{mm}$ .

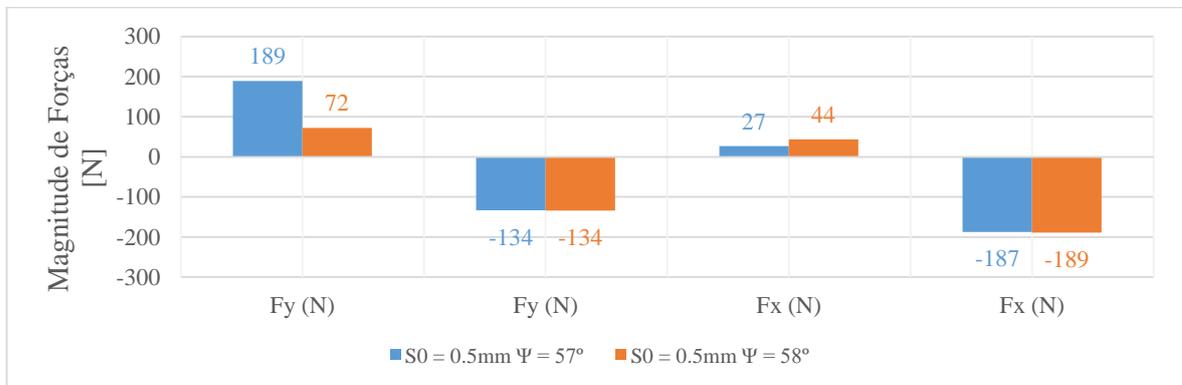


Figura 61 – Média das forças nos Eixos X e Y (Fx) [N] e (Fy) [N] para chapas com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  de espessura.

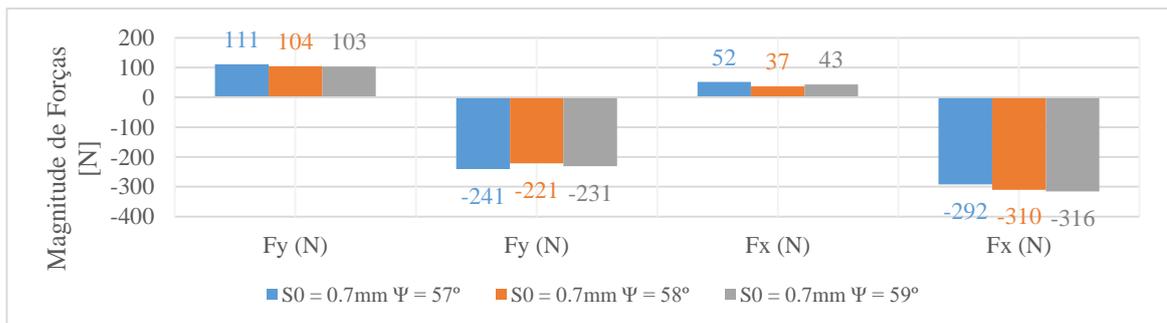


Figura 62 – Média das forças nos eixos X e Y (Fx) [N] e (Fy) [N] para chapas com  $s_0 = 0,7\text{mm}$  de espessura.

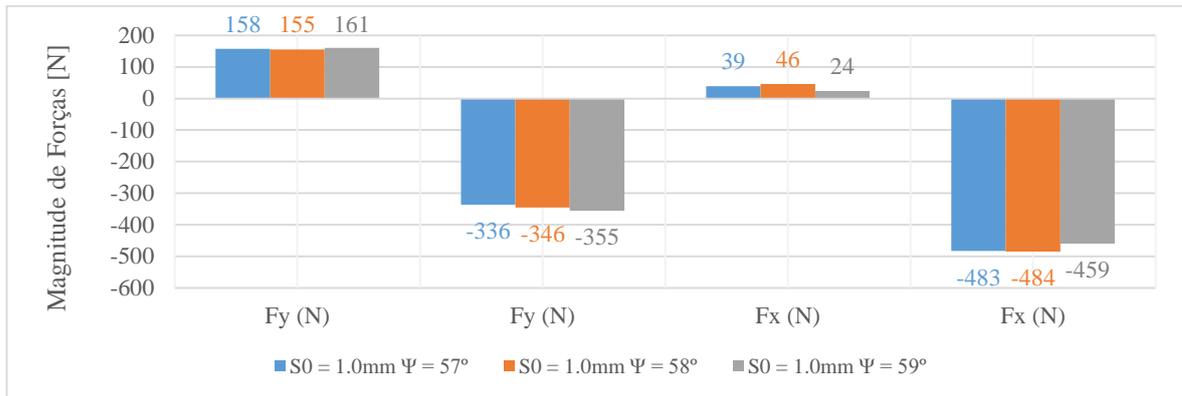


Figura 63 – Média das forças nos eixos X e Y ( $F_x$ ) [N] e ( $F_y$ ) [N] para chapas com  $s_0 = 1,0\text{mm}$  de espessura.

Apresenta-se também a Figura 64, com todos os dados médios para os 08 (oito) ensaios, podemos observar uma certa linearidade quando observando os dados apresentados para  $s_0 = 0,5\text{mm}$ ,  $s_0 = 0,7\text{mm}$  e  $s_0 = 1,0\text{mm}$ . Somente no primeiro caso onde a força em tração no eixo Y teve um média de  $F_y = 189\text{N}$ . Pode-se atribuir esta variação significativa devido a chapa com  $s_0 = 0,5\text{mm}$  ter rompido com ângulo de parede de  $\Psi = 59^\circ$ , o que ocorre de a chapa com  $\Psi = 58^\circ$  ter forças menores que a chapa com  $\Psi = 57^\circ$ , devido à resistência da chapa.

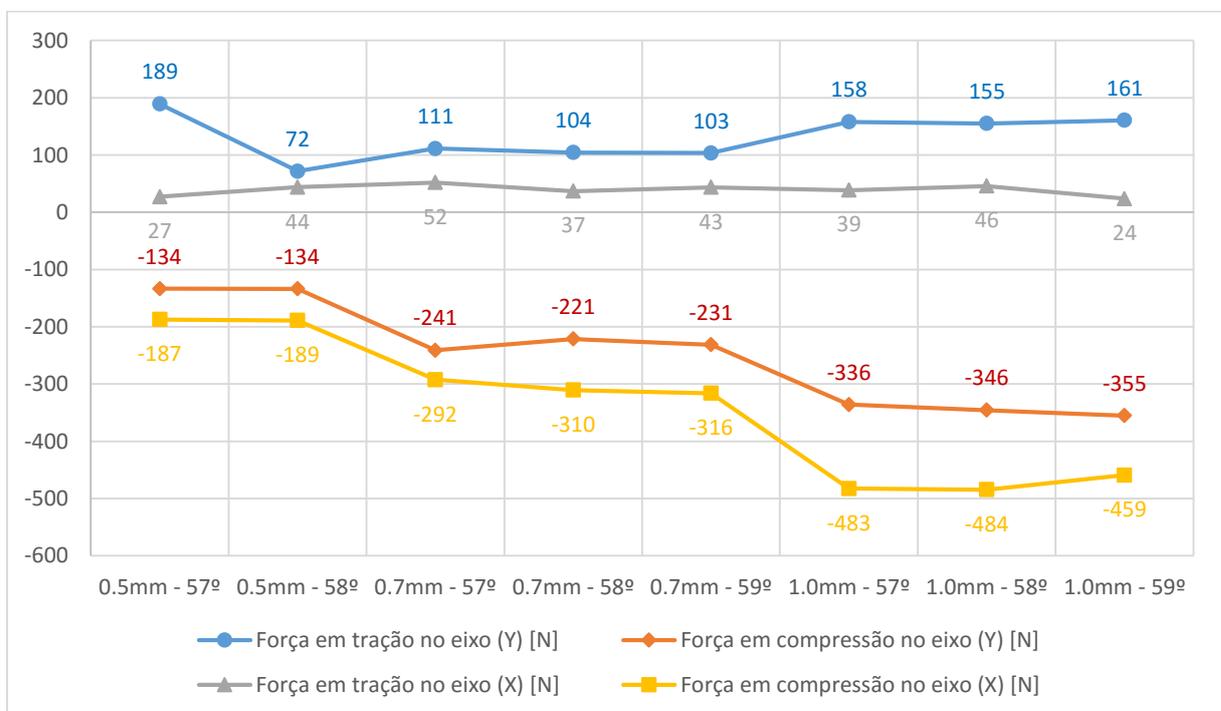


Figura 64 – Média das forças nos eixos X e Y para todas as chapas ensaiadas.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que a extensometria é um método de instrumentação passível de utilização para obtenção e análise de forças em ferramenta de ISF, mas requer tomados os cuidados pertinentes ao processo de calibração e controle das variáveis envolvidas.

A proposta principal do estudo de forças foi possível de serem analisadas. A partir da contabilização das médias das forças obtidas o ensaio 01 e ensaio 03 onde tem-se as chapas com espessura de  $s_0 = 0,5\text{mm}$ , para força de tração em relação ao eixo Y tem-se  $F_y = 189\text{N}$  e  $F_y = 72$  respectivamente, para força de tração em relação ao eixo X tem-se  $F_x = 27\text{N}$  e  $F_x = 44\text{N}$  respectivamente, para a força de compressão em relação ao eixo Y tem-se obteve-se  $F_y = -134\text{N}$  para ambos os dois ensaios, e ainda para as forças de compressão em relação ao eixo X tem-se  $F_x = -187$  para o ensaio 01 e para o ensaio 03 tem-se  $F_x = -189\text{N}$ .

Observando-se os dados apresentados pelos ensaios 05, 07 e 09, onde apresenta-se os dados para as chapas com espessura de  $s_0 = 0,7\text{mm}$ , para a força de tração em relação ao eixo Y tem-se  $F_y = 111$ ,  $F_y = 104$  e  $F_y = 103$ , variando-se o ângulo de parede em  $\psi = 57^\circ$ ,  $\psi = 58^\circ$  e  $\psi = 59^\circ$  respectivamente. Para os mesmos ângulos de parede e espessura da chapa, porém para as forças de tração em relação ao eixo X tem-se  $F_x = 52\text{N}$ ,  $F_x = 37\text{N}$  e  $F_x = 43\text{N}$ , ainda para os ensaios 05, 07 e 09 tem-se as forças de compressão em relação ao eixo Y de  $F_y = -241\text{N}$ ,  $F_y = -221\text{N}$  e  $F_y = -231\text{N}$  respectivamente. E por fim, para as forças de compressão em relação ao eixo X tem-se  $F_x = -292\text{N}$ ,  $F_x = -310\text{N}$  e  $F_x = -316\text{N}$ .

Tratando-se dos dados apresentados pelos ensaios 06, 08 e 10, tem-se a espessura da chapa em  $s_0 = 1,0\text{mm}$  e ângulo de parede de  $\psi = 57^\circ$ ,  $\psi = 58^\circ$  e  $\psi = 59^\circ$  respectivamente, tem-se para a força de tração em relação ao eixo Y de  $F_y = 158\text{N}$ ,  $F_y = 155\text{N}$  e  $F_y = 161$ , para as forças de tração em relação eixo X tem-se  $F_x = 39\text{N}$ ,  $F_x = 46\text{N}$  e  $F_x = 24\text{N}$ . Mantendo-se os mesmo ensaios, tem-se para as forças de compressão em relação ao eixo Y,  $F_y = -336\text{N}$ ,  $F_y = -346\text{N}$  e  $F_y = -355\text{N}$ , e ainda, para as forças de compressão em relação ao eixo X, tem-se  $F_x = -483\text{N}$ ,  $F_x = -484\text{N}$  e  $F_x = -459\text{N}$  para os ensaios 06, 08 e 10.

Quando se varia o ângulo de parede os valores das forças não sofrem grandes alterações, porém quando se observa sob a ótica da espessura das chapas, sim, ocorrem grandes diferenças nas forças. Outra constatação em se analisando as forças é de quem em compressão, os dados variam na casa dos 100N enquanto que para tração as variações são de aproximadamente 50N.

O método de calibração apresentado no trabalho seguiu todas as recomendações para que os sinais apresentados possuíssem confiabilidade. O uso do cálculo analítico e da Simulação Numérica foram alternativas utilizadas para comparação com o resultado experimentado. Ficou claro que o método de calibração atingiu as expectativas, já que apresentou resultados de variância que podem ser desconsiderados.

O sistema de aquisição de dados e tratamento de sinais aqui apresentado, pode ser replicado para outros estudos, já que no formato aqui desenvolvido foi corretamente aplicado com a função de análise e controle das forças envolvidas. Porém, o mesmo sofre influências de diversas outras variáveis que podem fazer com que haja variações mínimas, porém consideráveis no sistema de medição. Além de influências externas como interferências eletromagnéticas que podem induzir erros na capacidade de medição do sistema. Tratando-se de sinais aquisitados com baixa amplitude, na casa de mV, a resistividade do fio elétrico também pode influenciar os dados aquisitados.

Os rebaixos confeccionados na ferramenta como forma de facilitar a colagem dos extensômetros influenciaram diretamente na leitura das forças resultantes no processo, devido aos cantos desses rebaixos provocarem desvios nas linhas de tensão.

Em se tratando de sensores sensíveis como extensômetros, a temperatura no processo oferece influência de forma significativa. Foi provado que para este processo de ISF, a ferramenta não sofre grandes gradientes de temperatura, o que não influenciou de forma significativa a leitura dos sinais nos extensômetros, já que para ser considerada deveria apresentar um mínimo de diferença de 10°C, o que não ocorreu em todo o processo.

Os testes preliminares resultaram em forças de tração e compressão diferentes, ou seja, valores que na teoria deveriam ser equivalentes em tração e compressão são discrepantes devido ao formato geométrico da ferramenta. O teste preliminar ajudou a verificar o comportamento da ferramenta quando no processo de ISF, onde ocorrem movimentos de flexão nos dois sentidos da ferramenta.

Conclui-se ainda que quando processados dados médios de forças para as chapas de mesma espessura variando-se apenas o ângulo de parede, as forças atuantes na ferramenta de estampagem não mudam de forma considerável. Os maiores deslocamentos de forças apresentados no processo estão nas mudanças de direção, ou curvas, do processo de ISF.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No que tange a ferramenta utilizada neste estudo, desenvolver esta com uma geometria simétrica com o propósito de diminuir as variáveis envolvidas no processo de cálculo analítico. A partir da geometria simétrica efetuar a colagem dos extensômetros também de maneira simétrica, utilizando extensômetros na mesma posição para medida de força em tração e compressão. Realizar a caracterização do material da ferramenta para uma maior precisão nos cálculos.

Aprofunda os estudos na resistência da ferramenta afim de idealizar uma ferramenta de dimensionamento mais próximo da tarefa que será realizada. Assim diminuindo uso excessivo de materiais. E ainda por meio de estudo de dimensionamento ser capaz de definir métricas necessárias para dimensionamento e estruturação de máquinas dedicadas de ISF.

Referente ao processo de ISF utilizado neste estudo, seria interessante alterar a estratégia de estampagem para a paralela, dessa forma realizando o incremento vertical ( $\Delta z$ ) em um único ponto. Fazendo com que a ferramenta realmente esteja efetuando a medição de um estado axial de tensão. Efetuar ainda testes mais simples de estampagem, de maneira unidirecional propondo uma forma de estampagem específica para avaliação dos extensômetros individualmente.

No que se refere a extensometria, aplicar a utilização de extensômetros conhecidos como rosetas, servindo como identificadores de diversos estados axiais de tensões. Evitando que forças passem despercebidas ou que estejam influenciando de forma contrária ao sistema de medição. Utilizar-se de cargas de referência maiores para observar se a linearidade da calibração permanece com baixo desvio padrão. Além disso, efetuar testes específicos com chapas rompidas, como forma de análise do comportamento das forças a serem executadas nestes casos. Avaliar a possibilidade de utilização de extensômetros que permitem a leitura sem fio, podendo executar o procedimento de ISF com a ferramenta livre.

Avaliar o sistema de aquisição sob a ótica da eletricidade, validando a resistividade dos fios que interligam o sistema, harmônicas e induções por parte de equipamentos externos no sistema de leitura. Além de levar em consideração filtragens de sinais com Transformada de Fourier e Transformada Inversa de Fourier para tratamento dos sinais.

Realizar a Análise de Elementos Finitos com o auxílio de outros softwares disponíveis de mercado para confrontamento dos dados gerados nesse estudo.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. SCHAEFFER, *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [2] J. Castelan, “Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano,” Tese de Doutorado. 2010.
- [3] D. Fritzen, “Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Latão 70/30,” Dissertação de Mestrado. 2012.
- [4] G. et al. HIRT, “Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation,” *Inst. Mater. Technol. Form.*, p. 12, 2005.
- [5] J. Kopac and Z. Kampus, “Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 622–628, 2005.
- [6] M. A. Sellitto and C. Walter, “Medição e controle do tempo de atravessamento em um sistema de manufatura,” *Gestão & Produção*, vol. 15, no. 1, pp. 135–147, 2008.
- [7] M. Bambach, G. Hirt, and J. Ames, “Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process,” *AIP Conf. Proc.*, no. 1, pp. 1969–1974, 2004.
- [8] V. Chulvi, A. Sancho, D. Cebrián, R. Jiménez, and C. Muñoz, “Knowledge-Based Engineering in Cranioplasty Implant Design,” *Knowl. Creat. Diffus. Util.*, no. August, pp. 1–9, 2007.
- [9] W. Sun and P. Lal, “Recent development on computer aided tissue engineering - a review,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 67, no. 2, pp. 85–103, 2002.
- [10] E. Leszak, “Apparatus and process for incremental dieless forming,” Patent: US 3342051 A, p. 19, 1967.
- [11] A. Daleffe, “Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental,” Tese de Doutorado. 2014.
- [12] N. . REDDY, R. LINGAM, and J. CAO, “Incremental Metal Forming Processes in Manufacturing,” *Handb. Manuf. Eng. Technol.*, pp. 411 – 452, 2015.
- [13] K. Suresh and S. P. Regalla, “Analysis of Formability in Single Point Incremental Forming Using Finite Element Simulations,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmipc, pp. 430–435,

- 2014.
- [14] A. Daleffe, “Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro,” Dissertação de Mestrado. 2008.
- [15] P. A. F. RODRIGUES, J. M. C MARTINS, *Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica*. Escolar, 2010.
- [16] O. Martínez-Romero, M. L. García-Romeu, D. Olvera-Trejo, I. Bagudanch, and A. Elías-Zúñiga, “Tool Dynamics During Single Point Incremental Forming Process,” *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 2286–2291, 2014.
- [17] V. Oleksik, “Influence of Geometrical Parameters, Wall Angle and Part Shape on Thickness Reduction of Single Point Incremental Forming,” *Procedia Eng.*, vol. 81, pp. 2280–2285, 2014.
- [18] J. León, D. Salcedo, C. Ciáurriz, C. J. Luis, J. P. Fuertes, I. Puertas, and R. Luri, “Analysis of the influence of geometrical parameters on the mechanical properties of incremental sheet forming parts,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 445–453, 2013.
- [19] I. Paniti and J. Somló, “Novel Incremental Sheet Forming System with Tool-Path Calculation Approach,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 11, no. 7, pp. 43–60, 2014.
- [20] D. S. Malwad and V. M. Nandedkar, “Deformation Mechanism Analysis of Single Point Incremental Sheet Metal Forming,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpc, pp. 1505–1510, 2014.
- [21] M. B. Silva, L. M. Alves, and P. a F. Martins, “Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation,” *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 29, no. 4, pp. 557–566, 2010.
- [22] H. Meier, C. Magnus, and V. Smukala, “Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 327–330, 2011.
- [23] L. C. Cavaler, “Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304,” Tese de Doutorado. Porto Alegre, 2007.
- [24] Amino, “Dieless NC Forming Catalog.pdf,” 2012.
- [25] A. Attanasio, E. Ceretti, and C. Giardini, “Optimization of tool path in two points incremental forming,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 409–412, 2006.
- [26] B. Lu, Y. Fang, D. K. Xu, J. Chen, S. Ai, H. Long, H. Ou, and J. Cao, “Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming,” *Int. J. Mach. Tools*

- Manuf.*, vol. 93, pp. 37–48, 2015.
- [27] S. J. Yoon and D. Y. Yang, “An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheets from General Quadrilateral Sheet Blanks with Enhanced Process Features,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 221–224, 2005.
- [28] A. N. Bramley, J. Jeswiet, F. Micari, J. Duflou, and J. Allwood, “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal,” vol. 1, no. 1, 2005.
- [29] D. Nimbalkar and V. Nandedkar, “Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components,” *Int J Eng Res Appl*, vol. 3, no. 5, pp. 39–51, 2013.
- [30] J. Duflou, Y. Tunçkol, A. Szekeres, and P. Vanherck, “Experimental study on force measurements for single point incremental forming,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1–3, pp. 65–72, 2007.
- [31] P. a F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, and M. B. Silva, “Theory of single point incremental forming,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 247–252, 2008.
- [32] G. Ambrogio, L. Filice, and F. Micari, “A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 413–416, 2006.
- [33] I. Bagudanch, G. Centeno, C. Vallengano, and M. L. Garcia-Romeu, “Forming force in Single Point Incremental Forming under different bending conditions,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 354–360, 2013.
- [34] A. B. FIALHO, *Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises*. São Paulo: Erica, 2005.
- [35] A. R. de ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. Barueri, SP: Manole, 2008.
- [36] K. Hoffmann, “An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges,” *HBM Test Meas.*, p. 257, 2012.
- [37] N. INSTRUMENTS, “Strain gauge measurement,” *Natl. INSTRUMENTS*, 1998.
- [38] E. O. Doebelim, “Measurement Systems Application and Design,” 2003.
- [39] M. Rizal, J. a. Ghani, M. Z. Nuawi, and C. H. Che Haron, “Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 52–53, pp. 559–576, 2015.
- [40] H. Kato, K. Sasaki, and T. Mori, “Four-point bending test of the Bauschinger effect in

- prestrained IF steel thin sheet,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 642, pp. 150–156, 2015.
- [41] T. Pinkaew and P. Asnachinda, “Experimental study on the identification of dynamic axle loads of moving vehicles from the bending moments of bridges,” *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 9, pp. 2282–2293, 2007.
- [42] T. O. M. Bending and T. Loads, “Positioning strain gages,” *Report from Omega*, pp. 5–6, 2008.
- [43] H. Sarangi, K. S. R. K. Murthy, and D. Chakraborty, “Optimum strain gage locations for accurate determination of the mixed mode stress intensity factors,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 88, pp. 63–78, 2012.
- [44] C. Haremza, A. Santiago, and L. Simões da Silva, “Experimental behaviour of heated composite steel-concrete joints subject to variable bending moments and axial forces,” *Eng. Struct.*, vol. 51, pp. 150–165, 2013.
- [45] P. H. Guadagnini, F. Saraiva, and V. Elisabeth, “Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 5, pp. 752–762, 2011.
- [46] S. Chadli, N. Ababou, and a. Ababou, “Impactor calibration: Comparison between accelerometric measurements and extensometric processed data,” *7th Int. Work. Syst. Signal Process. their Appl. WoSSPA 2011*, pp. 275–278, 2011.
- [47] S. Poussier, H. Rabah, and S. Weber, “Smart Adaptable Strain Gage Conditioner: Hardware/Software Implementation,” *IEEE Sens. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 262–267, 2004.
- [48] M. L. C. C. Reis, R. M. Castro, and O. a F. Mello, “Calibration uncertainty estimation of a strain-gage external balance,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 1, pp. 24–33, 2013.
- [49] J. Zhang, S. L. Guo, Z. S. Wu, and Q. Q. Zhang, “Structural identification and damage detection through long-gauge strain measurements,” *Eng. Struct.*, vol. 99, pp. 173–183, 2015.
- [50] T. Ramos, D. F. O. Braga, S. Eslami, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, “Comparison Between Finite Element Method Simulation, Digital Image Correlation and Strain Gauges Measurements in a 3-Point Bending Flexural Test,” *Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 232–239, 2015.
- [51] E. Korkmaz, B. Bediz, B. A. Gozen, and O. B. Ozdoganlar, “Dynamic characterization of multi-axis dynamometers,” *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 148–161, 2014.
- [52] Vishay Measurements Group, “A brief introduction and guide to - selection, installation and instrumentation.” p. 46, 1992.
- [53] Vishay Precision Group, “Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation TN-514,” pp. 131–150, 2013.

- [54] J. G. Da Silva, a. a. Carvalho, and D. D. Silva, "A strain gage tactile sensor for finger-mounted applications," *Proc. 17th IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf. [Cat. No. 00CH37066]*, vol. 2, pp. 824–829, 2000.
- [55] ISO-376, "Metallic Materials - Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines," 2011.
- [56] V. Miller and M. Division, "Recommended Guide for Determining and Reporting Uncertainties for Balances and Scales - NISTIR 6919," US, 2002.
- [57] A. International, "Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines," US, 2006.
- [58] ABNT, "NBR 6674: materiais metálicos: calibração de instrumentos de medição de força de ensaios uniaxiais.," Rio de Janeiro, 1999.
- [59] ABNT, "NBR ISO 10012: sistemas de gestão de medição: requisitos para os processos de medição e equipamento de medição.," Rio de Janeiro, 2004.
- [60] ABNT, "ABNT ISO/IEC 17025: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração," Rio de Janeiro, 2005.
- [61] A. International, "Top-Loading , Direct-Reading Laboratory Scales and," US, 2013.
- [62] Hottinger Baldwin Messtechnik, "Universal amplifier," 2015.
- [63] Fluke Corporation, "Termovisor Fluke Ti32," 2015. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/brpt/termovisores/fluke-ti32.htm?pid=56184>. [Accessed: 22-Aug-2015].
- [64] R. C. Hibbeler, *Resistência dos materiais*. São Paulo: Prentice Hall, 2008.
- [65] M. Imran and Dr. Mohamed Haneef, "Comparative Studies on Curved Beam Under Different Loading Conditions using Strain Gauges and ANSYS," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 05, pp. 104–107, 2015.
- [66] J. Castelan, "Utilização Das Tecnologias Cad / Cam Para Estampagem Incremental Do Alumínio Série 1000," Dissertação de Mestrado. 2007.

**APÊNDICE A: TABELA DE AUTOCOMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA DOS  
EXTENSÔMETROS USADOS NOS EXPERIMENTOS**

# EXCEL

**EXTENSÔMETRO COLAVEL DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

MODELO

**PA-06-250BA-350**

**UNIDIRECIONAL SIMPLES**

LOTE DE FABRICAÇÃO

**140410**

BASE ISOLANTE

Em polyimida laminado.

Apresenta flexibilidade e facilidade de manipulação

GRADE METÁLICA

Em liga metálica formada por 55% de níquel e 45% de cobre.

Apresenta marcas de centragem para facilitar o seu correto posicionamento no local desejado.

DIMENSÕES

CADA GRELHA: 6,35 X 3,18 mm

TOTAL: 9,47 X 3,18 mm

ALONGAMENTO MÁXIMO

APROX. +/- 3% PARA APLICAÇÕES EM  
EXTENSOMETRIA

RESISTÊNCIA ELÉTRICA

350,0 +/- 0,5 ohms

FATOR DE SENSIBILIDADE

K = 2,12 +/- 1%

AUTO COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA

PARA AÇO

TABELA DE AUTOCOMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA

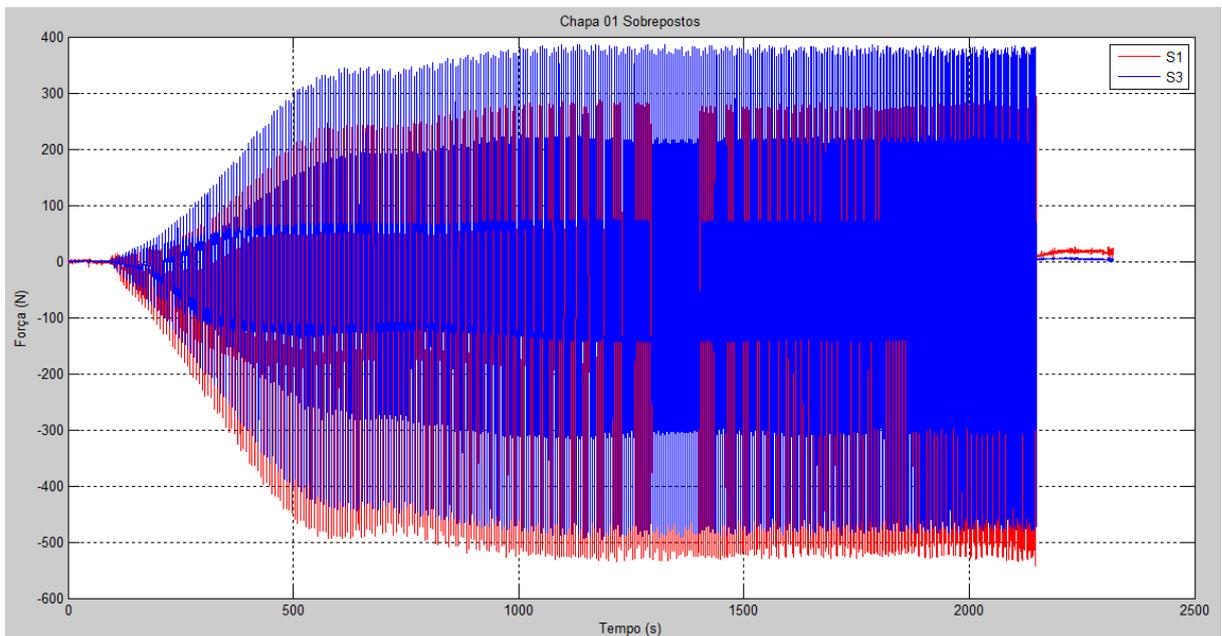
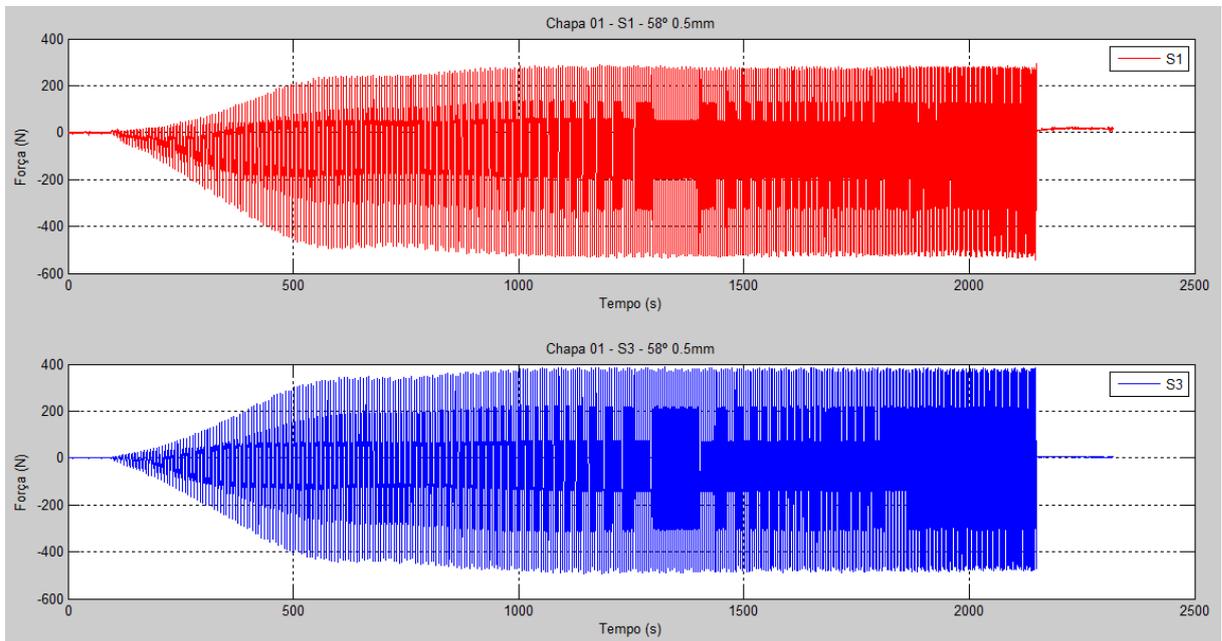
<u>TEMPERATURA</u> °C	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
<u>DEFORMAÇÃO</u> µε	-120	-80	-30	-10	+10	+20	+20	+10	-10	-20	-40	-50	-70

**EXCEL SENSORES IND. COM. EXPORT. LTDA**

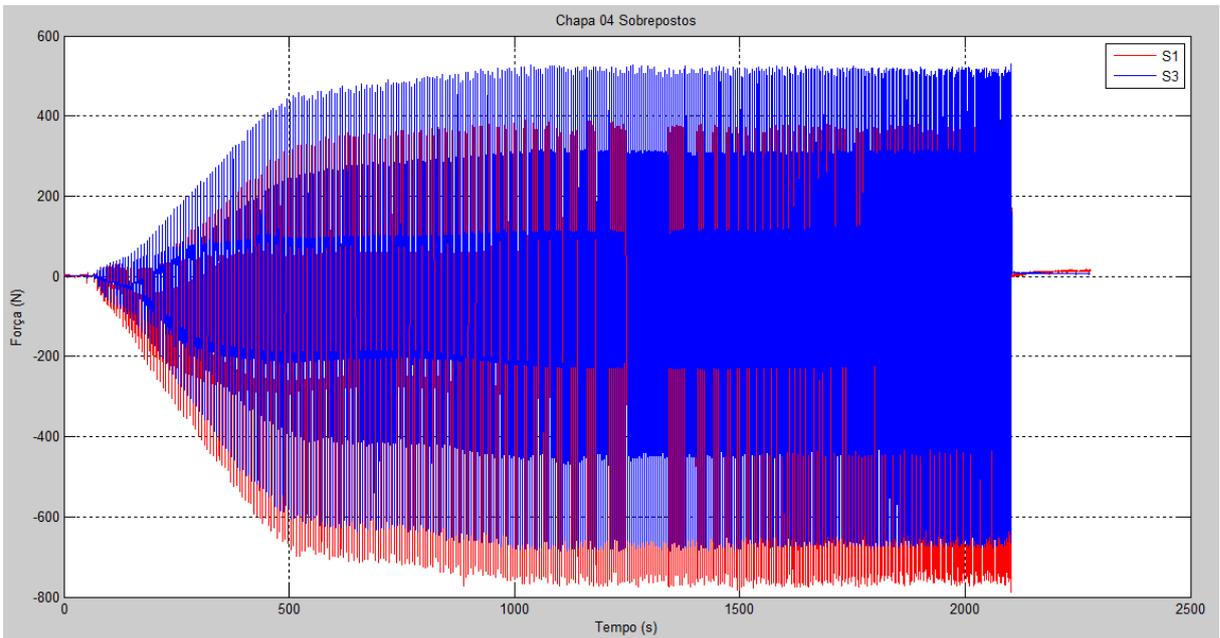
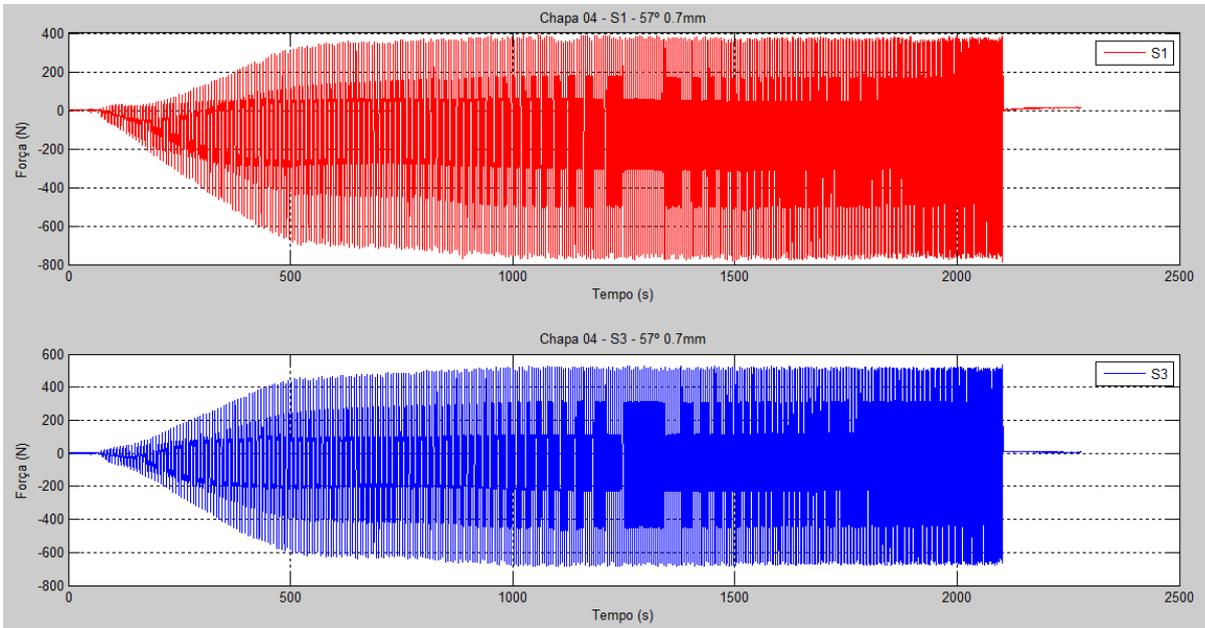
**TEL / FAX (11) 4781-1490**

ESTR. MARIA JOSÉ FERRAZ PRADO, 4915-ITATUBA - EMBÚ-SP-CEP 06845-070

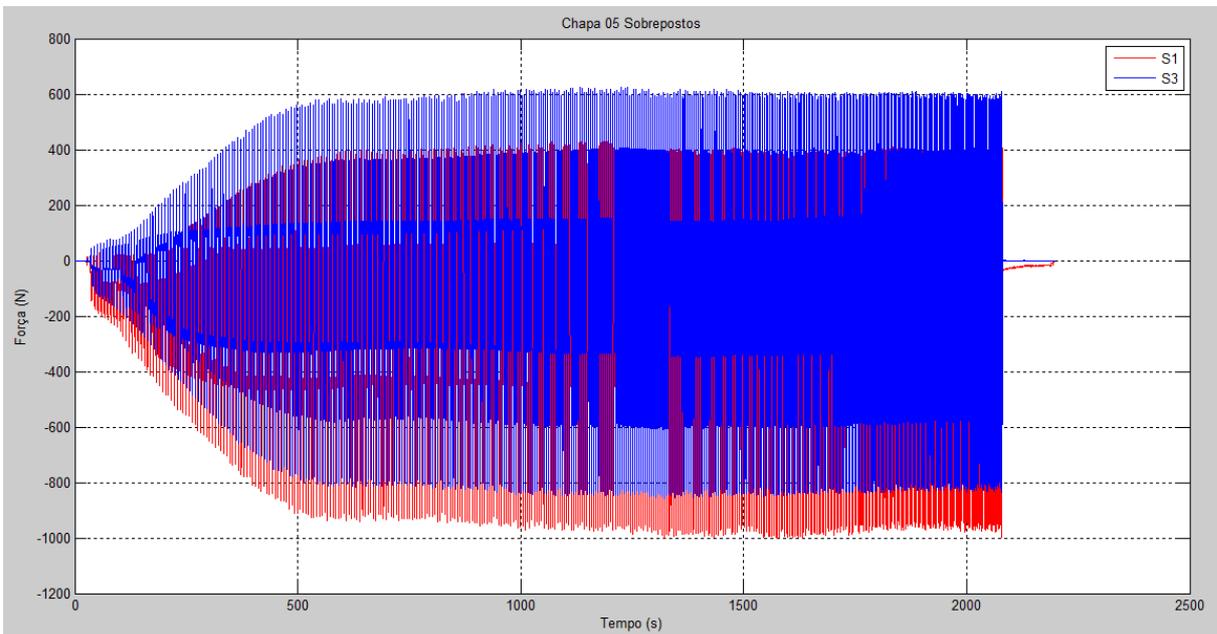
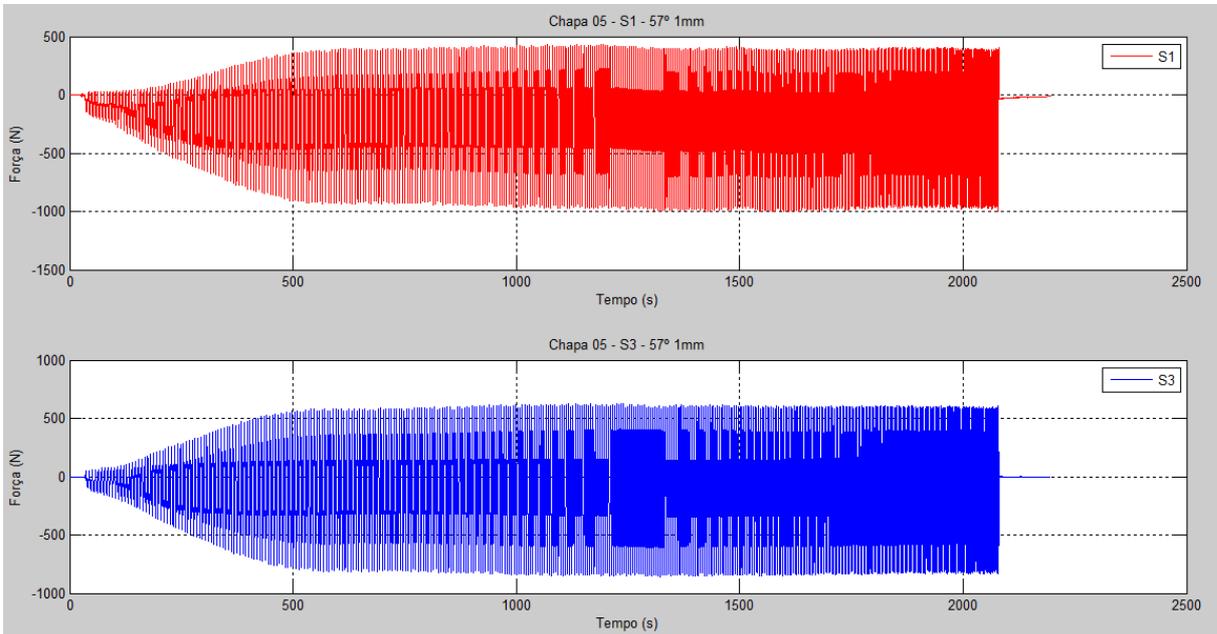
**APÊNDICE B: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 01 – CHAPA COM  $s_0 = 0,5\text{MM}$  E  $\Psi = 58^\circ$**



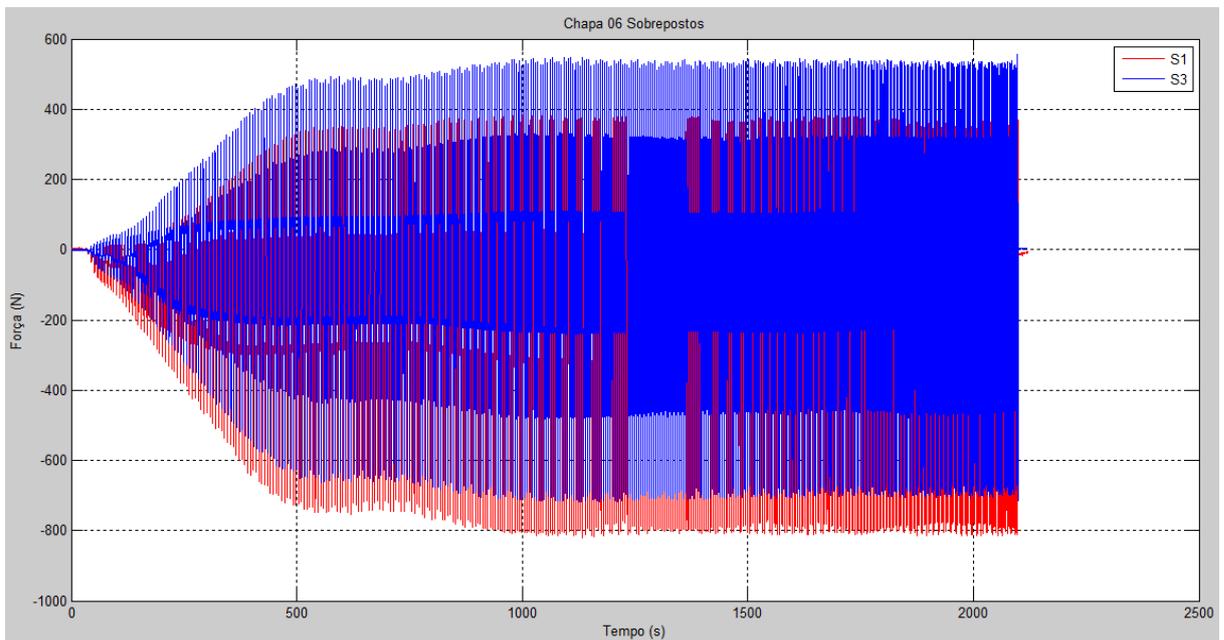
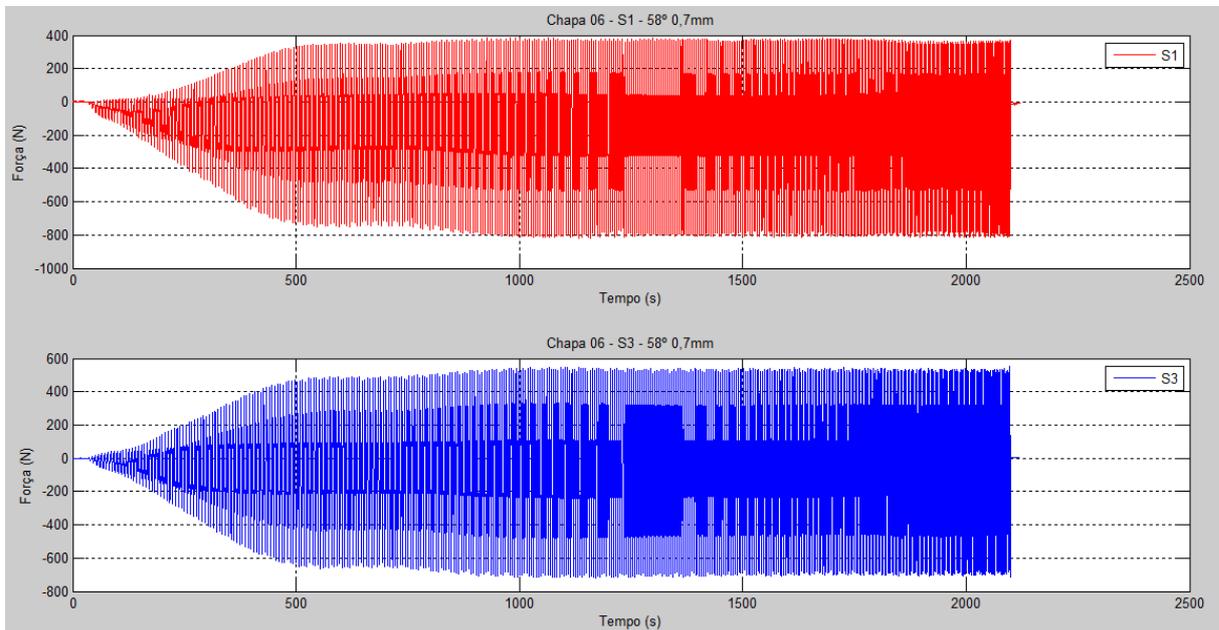
**APÊNDICE C: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 04 – CHAPA COM  $s_0 = 0,7\text{MM}$  E  $\Psi = 57^\circ$**



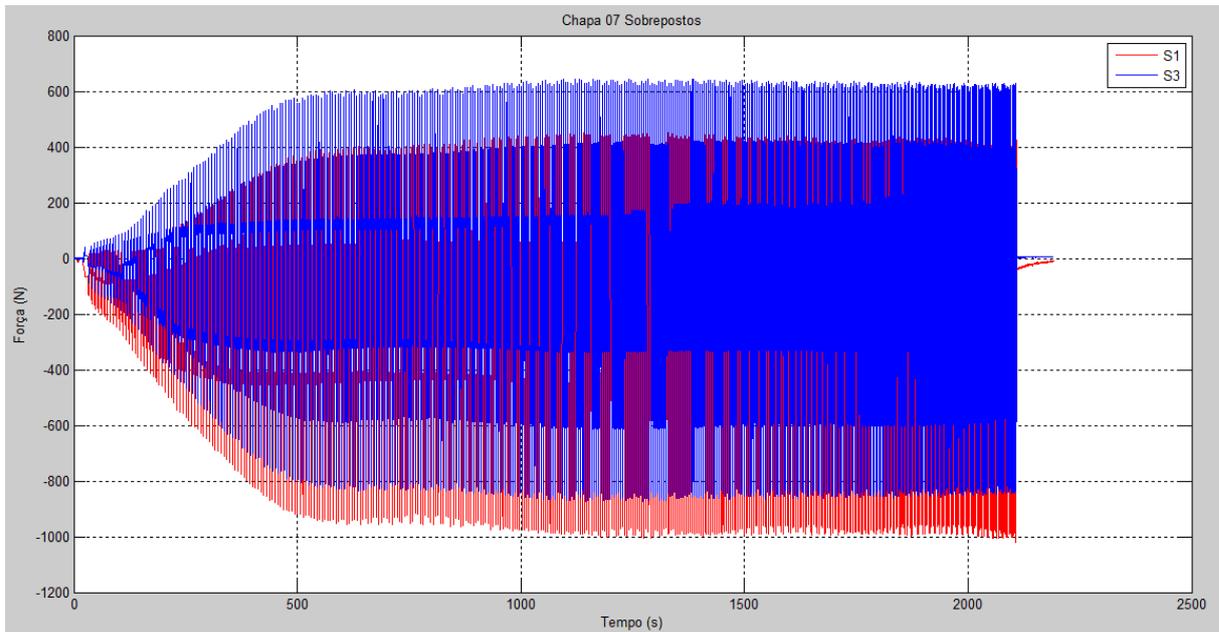
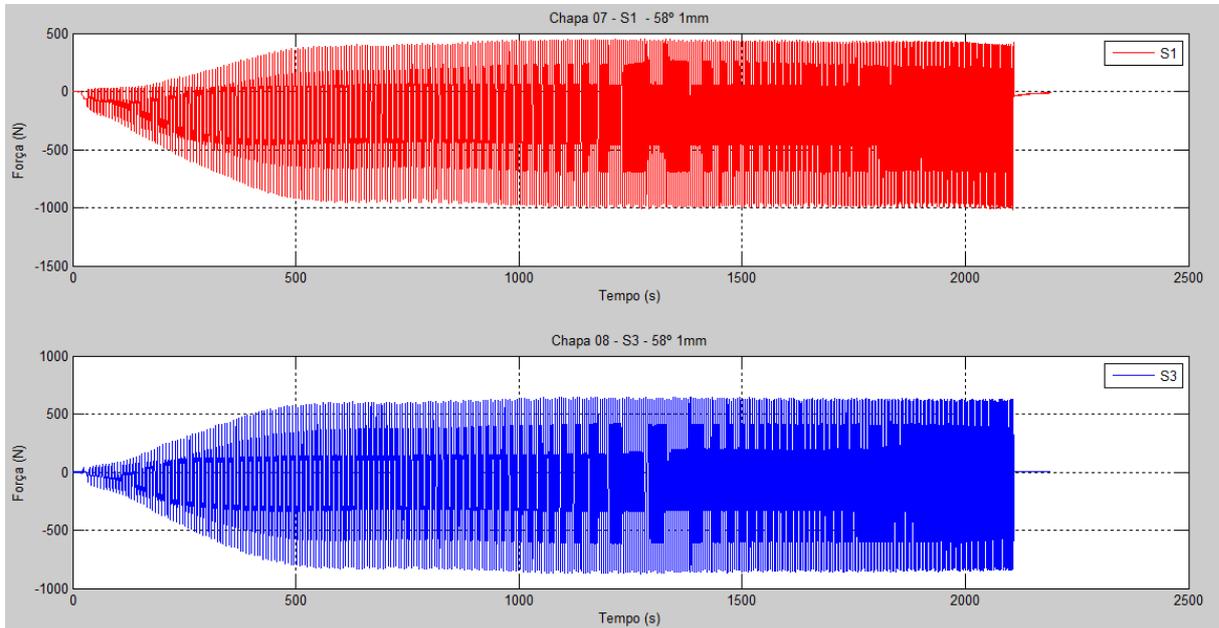
**APÊNDICE D: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 05 – CHAPA COM  $s_0 = 1\text{MM}$  E  $\Psi = 57^\circ$**



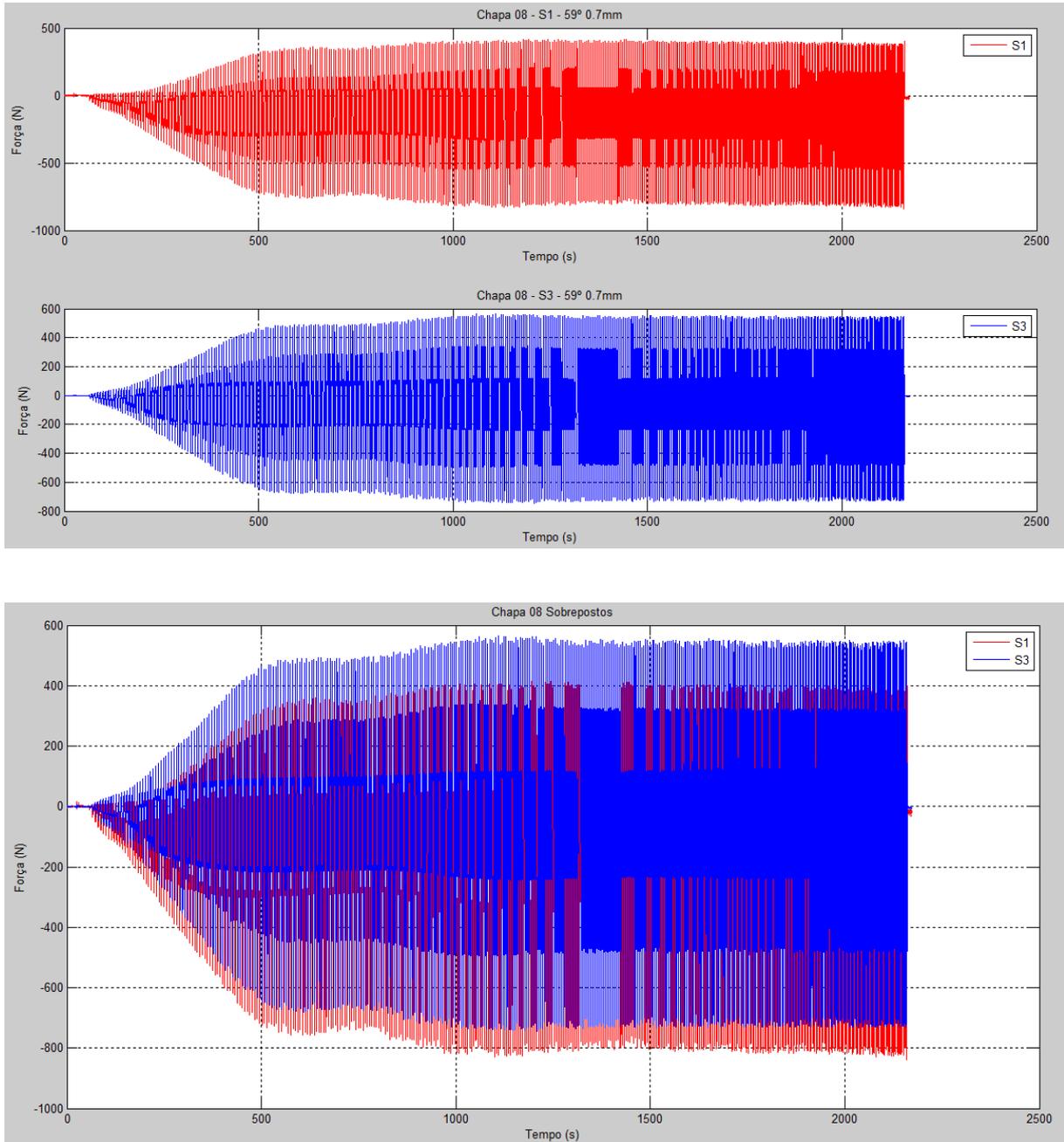
**APÊNDICE E: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 06 – CHAPA COM  $s_0 = 0,7\text{MM}$  E  $\Psi = 58^\circ$**



**APÊNDICE F: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 07 – CHAPA COM  $s_0 = 1\text{MM}$  E  $\Psi = 58^\circ$**



**APÊNDICE G: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 08 – CHAPA COM  $s_0 = 0,7\text{MM}$  E  $\Psi = 59^\circ$**



**APÊNDICE H: SINAL COMPLETO CAPTURADO PARA SENSORES S1 E S3 –  
ENSAIO 09 – CHAPA COM  $s_0 = 1\text{MM}$  E  $\Psi = 59^\circ$**

