

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

DIEGO CONTE AYALA PENALVER

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO PARA SENSORES DE  
PRESSÃO ISOLADOS DO MEIO

São Paulo  
Abril / 2016

DIEGO CONTE AYALA PENALVER

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO PARA SENSORES DE  
PRESSÃO ISOLADOS DO MEIO

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Humber Furlan.

São Paulo  
Abril /2016

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA  
FATEC-SP / CEETEPS

P397o Penalver, Diego Conte Ayala  
Otimização do processo de encapsulamento para sensores de  
pressão isolados do meio. / Diego Conte Ayala Penalver. – São  
Paulo : CEETEPS, 2016.  
87 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Humber Furlan  
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em  
Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica  
Paula Souza, 2016.

1. Encapsulamento. 2. Ajuste por Interferência. 3. Sensor de  
Pressão. I. Furlan, Humber. II. Centro Estadual de Educação  
Tecnológica Paula Souza. III. Título.

DIEGO CONTE AYALA PENALVER

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO PARA SENSORES DE  
PRESSÃO ISOLADOS DO MEIO

---

Prof. Dr. Humber Furlan

---

Profª. Dra. Mariana Amorim Fraga

---

Prof. Dr. Luiz Antônio Rasia

---

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo, 8 de Abril de 2016

Aos Professores, expresso a minha eterna gratidão e reconhecimento, pois sem esta figura de extrema importância seria impossível a evolução da humanidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato à Deus por me inspirar nesta caminhada em busca de novos conhecimentos, à minha família pelo apoio, companheirismo, dedicação, paciência e amorosidade, e aos amigos que contribuíram com este trabalho de forma imprescindível, aos funcionários da FATEC-SP e da pós-graduação do Centro Paula Souza pela atenção e prestatividade, e ao Professor Orientador pelo incentivo, direcionamento e amizade.

Ó mar salgado, quanto do teu sal  
São lágrimas de Portugal!  
Por te cruzarmos, quantas mães choraram,  
Quantos filhos em vão rezaram!

Quantas noivas ficaram por casar  
Para que fosses nosso, ó mar!  
Valeu a pena? Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena.

Quem quer passar além do Bojador  
Tem que passar além da dor.  
Deus ao mar o perigo e o abismo deu,  
Mas nele é que espelhou o céu.

**Fernando Pessoa**

## RESUMO

PENALVER, C. A. D. **Otimização do processo de encapsulamento para sensores de pressão isolados do meio**: 87 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2016.

O presente trabalho tem por objetivo, desenvolver uma cápsula metálica que utiliza a montagem com interferência mecânica, podendo substituir o processo de soldagem no encapsulamento de sensores de pressão isolados do meio. Foram realizados ensaios de caracterização do aço inoxidável 316, usinagem das peças da cápsula, montagem do conjunto e ensaios que comprovassem a estanqueidade. Os resultados mostram que a viabilidade deste método pode ser satisfatória para atender encapsulamento de sensores de pressão até 1000 Bar.

**Palavras-chave:** Encapsulamento, Ajuste por Interferência, Sensor de Pressão.

## ABSTRACT

PENALVER, C. A. D. **Otimização do processo de encapsulamento para sensores de pressão isolados do meio**: 87 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2016.

The present work aims to develop a capsule that uses the interference fit, and may replace the welding process in the isolated pressure sensors. Characterization tests were made of stainless steel 316, machining of capsule parts, assembly and check the leak test. The results show that, the feasibility of this method can be satisfactory to supply pressure sensors packages with range up to 1000 Bar.

Keywords: Packaging, Interference Fit, Pressure Sensor.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do aço inoxidável 316, e respectivos nomes em alguns países e suas normas. ....	32
Tabela 2: Composição Química do aço AISI 316. ....	33
Tabela 3 Propriedades Mecânicas do aço AISI 316. ....	33
Tabela 4 Propriedades térmicas do aço AISI 316. ....	34
Tabela 5 Propriedades elétricas do aço AISI 316. ....	34
Tabela 6: Contém os valores das medições da peça Capa, e as suas respectivas médias. ....	48
Tabela 7: Contém os valores das medições da peça Base e as suas respectivas médias. ....	50
Tabela 8: Exemplifica o valor da Interferência de cada conjunto. ....	52
Tabela 9: Resultados dos testes de estanqueidade. ....	72
Tabela 10 Equipamentos e suas localizações. ....	79
Tabela 11: Descrição Ilustrativa do Processo de usinagem das peças Capa e Base. ....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem de engrenagens MEMS construídas utilizando as técnicas de fabricação da microeletrônica .....	15
Figura 2: Comparação das dimensões geométricas entre um ácaro e estruturas MEMS.....	15
Figura 3: Fotografia de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de cavidade fabricada com KOH .....	16
Figura 4: Fotografia (MEV) de um diafragma construído em silício monocristalino. ....	17
Figura 5: Desenho esquemático da configuração dos elementos piezoresistivos em ponte de Wheatstone. ....	18
Figura 6: Desenho do projeto do sensor de pressão fabricado.....	19
Figura 7: fotografia de topo, em microscópio óptico, do sensor fabricado .....	19
Figura 8: fotografia indicando as dimensões do sensor de pressão fabricado.....	20
Figura 9: Montagem de fotografias com os componentes que fazem parte da cápsula do Sensor Isolado do Meio. ....	21
Figura 10: Fotografia do Sensor Isolado do Meio .....	26
Figura 11: Desenho da capa do Sensor Isolada do Meio feito no Solid Edge ( ST6).....	27
Figura 12: Desenho da capa feito no Solid Works.....	28
Figura 13: Desenho da Base feito em Solid Edge.....	29
Figura 14: Imagem do Sistema de Ajustes e Tolerâncias .....	30
Figura 15: Imagem do organograma de desenvolvimento .....	40
Figura 16: Fotografia do Espectrômetro de Massa FATEC-SP.....	42
Figura 17: Fotografia do ensaio de espectrometria.....	42
Figura 18: Fotografia dos Corpos de Prova .....	43
Figura 19: Fotografia da Máquina Universal de Ensaio FATEC-SP. ....	44
Figura 20: Fotografia do extensômetro usado no primeiro ensaio. ....	45
Figura 21: Fotografia do extensômetro usado nos ensaios 2, 3, 4 e 5.....	45
Figura 22: Fotografia do corpo de prova sendo tracionado.....	46
Figura 23: Fotografia do Torno CNC - FATEC-SP.....	47
Figura 24: Fotografia das partes que compõem a cápsula.....	54
Figura 25: Imagem criada em Solid Edge. ....	54
Figura 26: Fotografia do Forno do Laboratório de Materiais FATEC-SP.....	55
Figura 27: Fotografia do gabarito de montagem das cápsulas.....	56

Figura 28: Fotografia da Prensa do Laboratório de Materiais FATEC-SP.....	56
Figura 29: Fotografia do Lote 2 e Gabaritos no Forno à 400° C.....	57
Figura 30: Fotografia comparativa dos métodos de prensagem a quente.....	58
Figura 31: Fotografia da Cuba e Cápsulas ao lado da Bomba de vácuo (ORION).....	59
Figura 32: Fotografia cápsulas sendo preenchidas com óleo.....	60
Figura 33: Fotografia das capsulas vedadas por uma esfera na Prensa (ORION). ....	61
Figura 34: Fotografia das cápsulas do lote 1 prontas. ....	62
Figura 35: Fotografia do Booster Hidropneumático (ORION).....	63
Figura 36: Fotografias do adaptador para testes no Booster Hidropneumático.....	64
Figura 37: Fotografia do novo adaptador para testes .....	65
Figura 38: Fotografia da Balança de Peso Morto e cápsulas do lote 2. ....	66
Figura 39: Fotografia da cápsula N°3. ....	68
Figura 40: Fotografia do adaptador com furo de centro. ....	69
Figura 41: Fotografia do adaptador com a cápsula N°6.....	70
Figura 42: Fotografia do adaptador com anel Oring fora do alojamento. ....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço, (American Iron and Steel Institute)
CEETPS	Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
CI's	Circuitos Integrados
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa
FUNCATE	Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais
GTAW	Gás de Blindagem de Tungstênio no Arco de Solda (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding).
KOH	Hidróxido de Potásio
MEMS	Sistema Micro Elétrico Mecânico, (Micro Electric Mechanical System)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MUT	Máquina Universal de Testes
NBR	Norma Brasileira
PIPE	Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas
SIM	Sensor Isolado do Meio

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Questão de pesquisa .....	23
1.2 Objetivo .....	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	24
2.1 O Processo de Encapsulamento.....	25
2.2 A Técnica de Ajuste .....	30
3 METODOLOGIA.....	39
4 EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E MAQUINÁRIOS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO. ....	41
4.1 Ensaio de caracterização do Aço AISI 316.....	41
4.2 Processos de Fabricação dos Protótipos .....	47
4.3 Montagem da Cápsula. ....	52
4.4 Ensaio de Estanqueidade .....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
6 CONCLUSÃO.....	74
TRABALHOS FUTUROS.....	75
REFERÊNCIAS .....	76
ANEXOS.....	78

## 1 INTRODUÇÃO

A pressão é a grandeza física mais medida, controlada e observada, dantes Galileu que desenvolveu uma bomba d'água para irrigação, e Torricelli medindo a pressão atmosférica com o barômetro. A pressão é uma variável que influi direta ou indiretamente em nosso cotidiano, assim como nos equipamentos, e ou nos processos de fabricação destes, abrangendo desde simples equipamentos domésticos, até industriais e de cunho científico. Tem importância fundamental nos transportes terrestres, náuticos, aéreos e aeroespaciais ou na indústria como controle de processos, sendo estes, nível, volume, vazão e densidade.

O desenvolvimento dos equipamentos de medição e controle da pressão evoluíram em conjunto com as novas tecnologias. Os manômetros e as válvulas de segurança (válvulas de alívio), tiveram extrema importância na era a vapor, pois sem estes equipamentos as caldeiras se tornariam verdadeiras bombas.

Com a chegada da eletricidade, da eletrônica e, atualmente, da microeletrônica, estes métodos de controle foram aprimorados, como por exemplo: controladores de pressão que sentem a pressão e atuam de acordo com a programação pré-estabelecida e abrem ou fecham as válvulas para alívio da pressão ou contenção desta, tornando-se um sistema automatizado.

O alto grau de desenvolvimento e sofisticação que vem alcançando as etapas de processos da microeletrônica permite o aparecimento de sistemas multifuncionais ou microssistemas integrados, MEMS (Micro Electric Mechanical System), com características próprias muito atraentes tais como: tamanhos reduzidos, baixo custo, alta confiabilidade e possibilidades de incluir seu próprio circuito eletrônico para processamento do sinal (FURLAN. H, 2003).

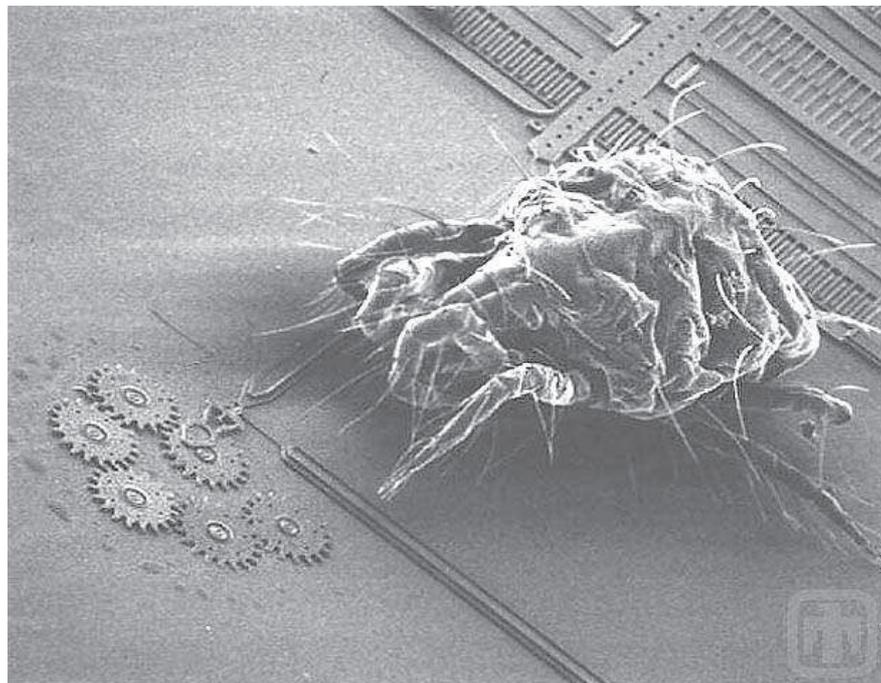
A filosofia dos MEMS envolve a capacidade de criar estruturas móveis, mecânicas e controláveis utilizando os processos de circuitos integrados (CI's) e demais técnicas de microeletrônica (CHAVEZ, et all, 1996).

As Figuras 1 e 2 mostram sistemas eletromecânicos criados com os processos de fabricação de CI's.



**Figura 1:** Imagem de engrenagens MEMS construídas utilizando as técnicas de fabricação da microeletrônica.

**Fonte:** <http://www.memx.com/images/ratchet.jpg>



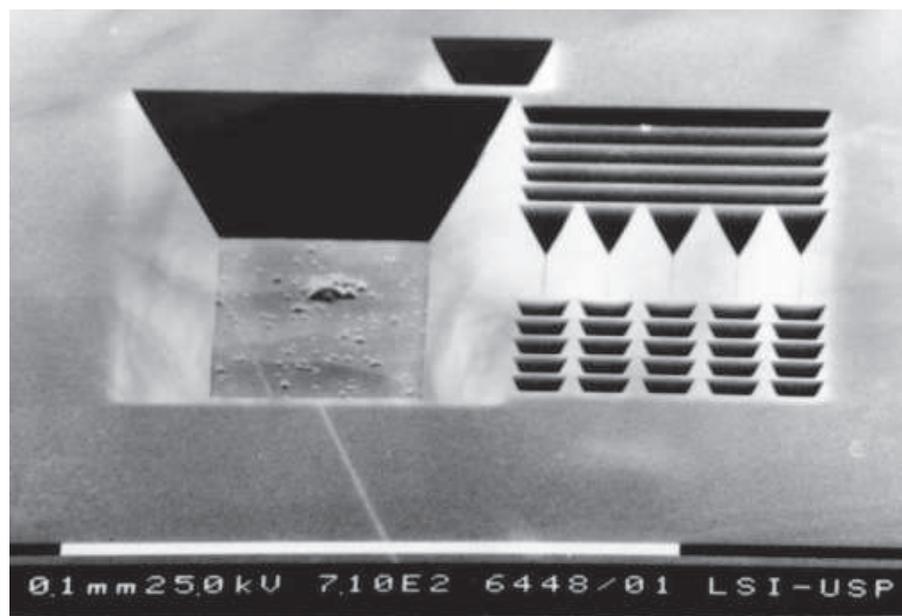
**Figura 2:** Comparação das dimensões geométricas entre um ácaro e estruturas MEMS.

**Fonte:** [http://www.sandia.gov/mstc/\\_assets/images/mems/gallery/bugs/5.jpg](http://www.sandia.gov/mstc/_assets/images/mems/gallery/bugs/5.jpg)

As etapas dos processos de microeletrônica são: Oxidação do silício, fotolitografia, deposição e remoção de materiais utilizando plasmas químicos, processos de limpeza e ambientes ultra-limpos. A micro usinagem de silício é a tecnologia fundamental para a indústria MEMS, e esta se dá geralmente por um processo de ataque químico do silício, e permite a realização de uma variedade de microestruturas tridimensionais tais como: diafragmas, pontes, vigas, agulhas, orifícios e outros.

A micro usinagem pode ainda, ser dividida em dois grupos: micro usinagem de corpo, e micro usinagem de superfície. A micro usinagem de corpo permite a fabricação dos sensores de pressão que constam de um diafragma feito no próprio corpo do silício, somente com a remoção eletroquímica do material utilizando, por exemplo, soluções de KOH em água, (FURLAN. H, 2003).

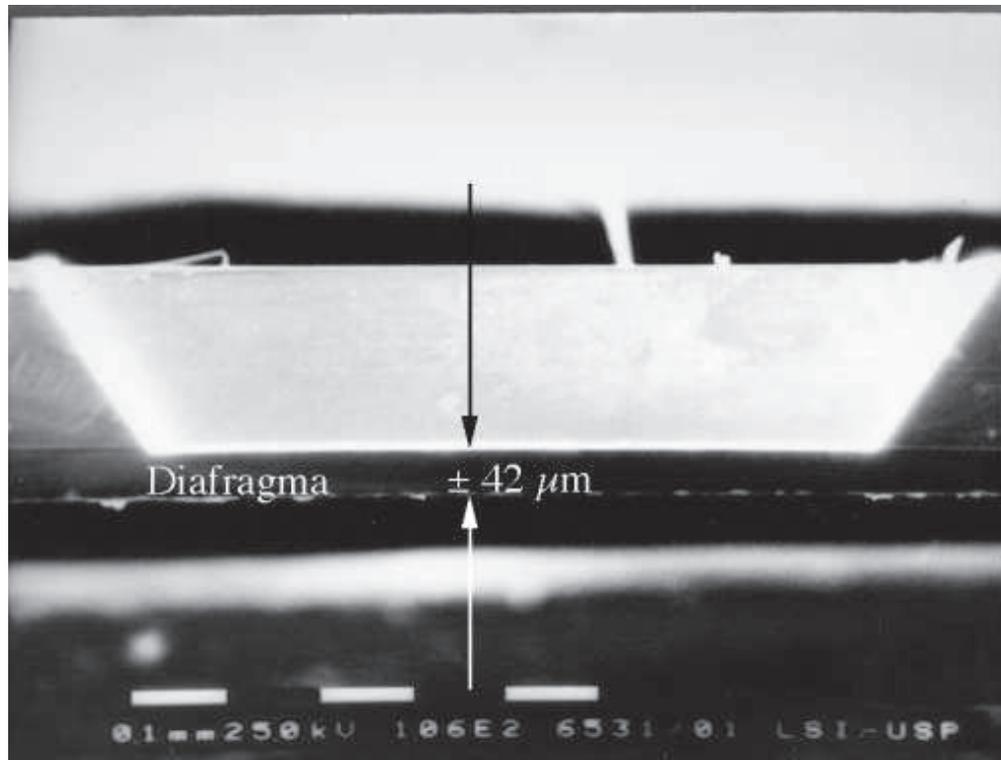
Essa reação à corrosão é anisotrópica, ou seja, a solução tem preferências de ataque, por exemplo, se tratando do material monocristalino como o silício utilizado para fabricação de CI's. A taxa de corrosão entre os planos depende da concentração da solução de KOH, da temperatura de processo e da agitação da solução, e pode chegar à 100:1 entre os planos cristalográficos (100) e (111), (SEIDEL. H, et al, 1990). As formas geométricas obtidas após corrosão anisotrópica do silício em KOH estão mostradas na Figura 3. Observa-se claramente que a base da cavidade é o plano (100) e suas paredes são da família {111}.



**Figura 3: Fotografia de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de cavidade fabricada com KOH**

**Fonte: FURLAN. H**

Aproveitando desse feito, consegue-se fabricar diafragmas de silício para fabricação dos microssensores de pressão como mostrado na Figura 4, (FURLAN. H, 2003).



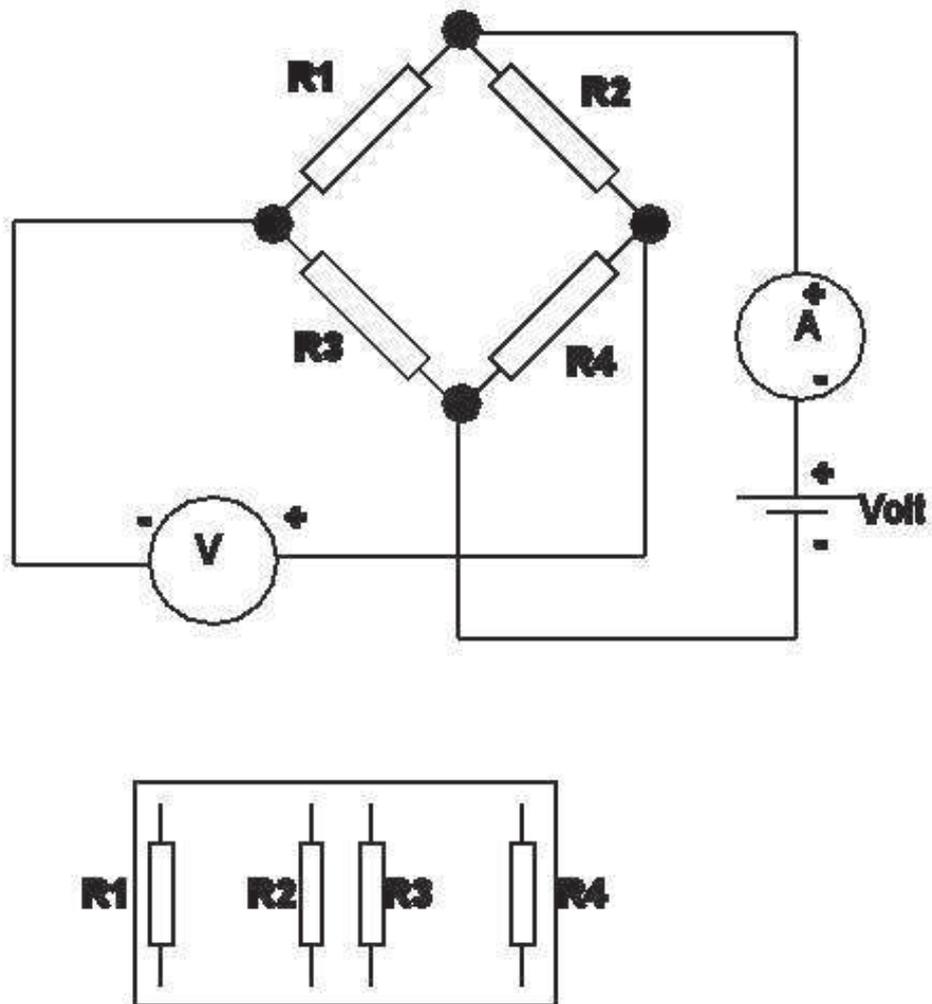
**Figura 4: Fotografia (MEV) de um diafragma construído em silício monocristalino.**

**Fonte: FURLAN. H**

Quando a estrutura em diafragma, mostrada na Figura 4, sofre um esforço em sua região central, ela se deflete em ordem de micrômetros, o que indica a ação de uma pressão. Para se medir essa deflexão, implantam-se ou difundem-se, transdutores piezoresistivos, ligados em ponte de Wheatstone, que variam sua resistência elétrica em decorrência do estresse provocado no diafragma pela deflexão deste.

Na Figura 5 se mostra um esquema elétrico da ponte de Wheatstone e a configuração dos piezoresistores no diafragma do sensor de pressão de forma paralela.

□

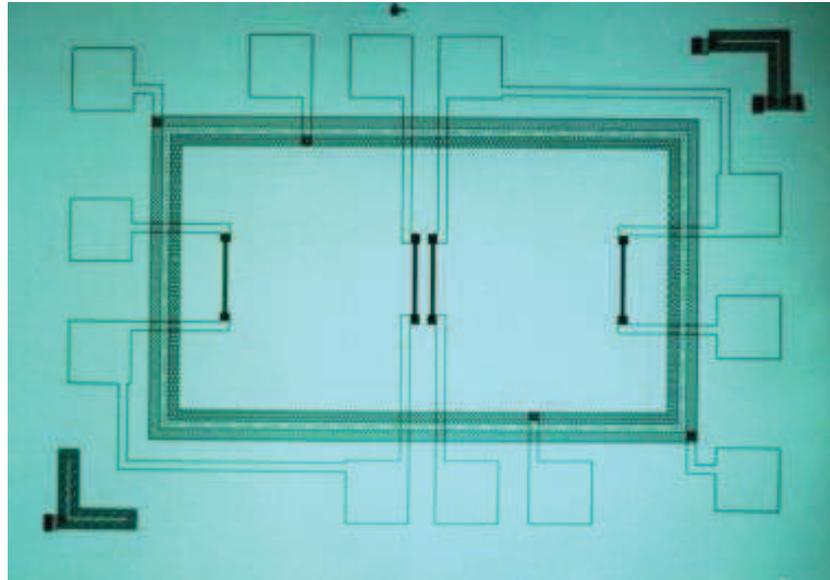


□

Figura 5: Desenho esquemático da configuração dos elementos piezoresistivos em ponte de Wheatstone.

Fonte: FURLAN, H

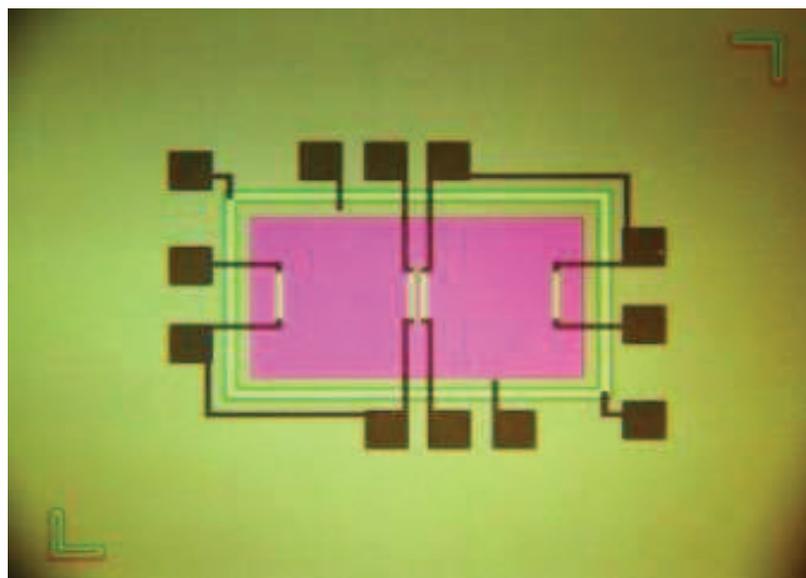
A Figura 6 mostra a visão do projeto de um sensor piezoresistivo de pressão.



**Figura 6: Desenho do projeto do sensor de pressão fabricado**

**Fonte: FURLAN. H**

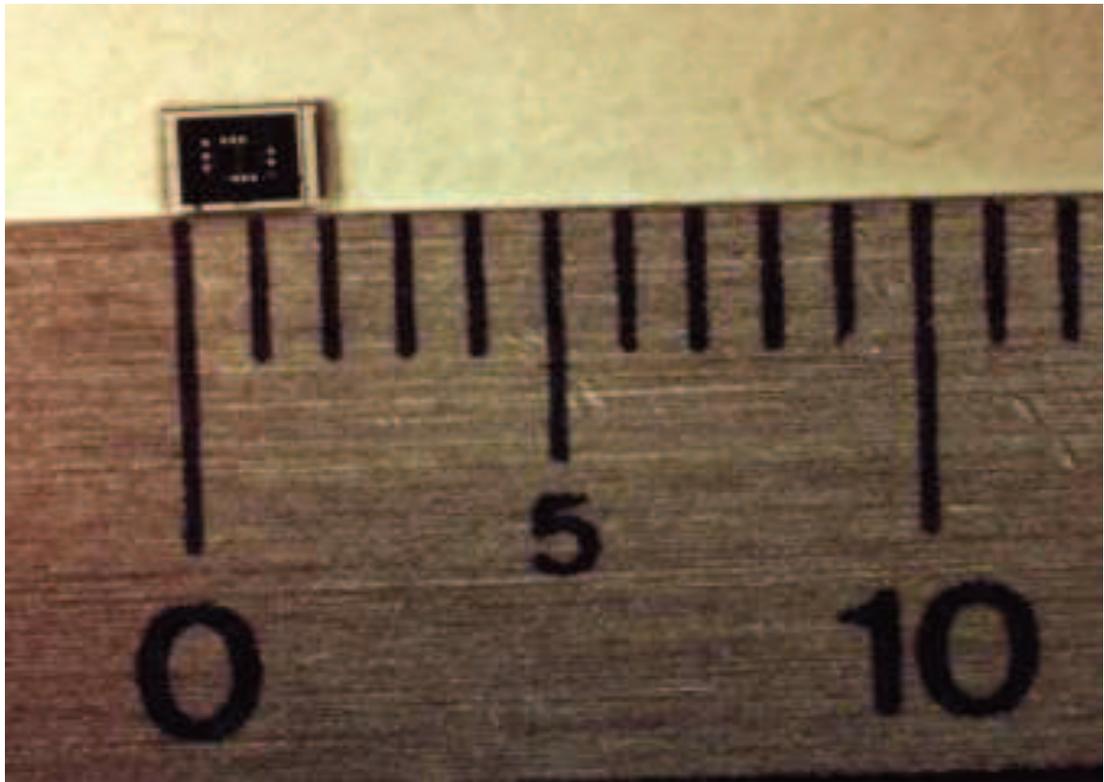
Na Figura 7 se vê em tons esverdeados a camada de óxido de silício, em rosa o óxido de silício fino sobre o diafragma, nas linhas em verde claro os anéis de guarda como proteção elétrica dos elementos piezoresistores e em marrom os terminais para conexão elétrica do sensor.



**Figura 7: fotografia de topo, em microscópio óptico, do sensor fabricado**

**Fonte: FURLAN. H**

Na Figura 8 tem-se o chip sensor, frente a uma régua milimetrada, para comparação de suas dimensões geométricas que é de 2 mm após corte com serra diamantada, (FURLAN. H, 2003).

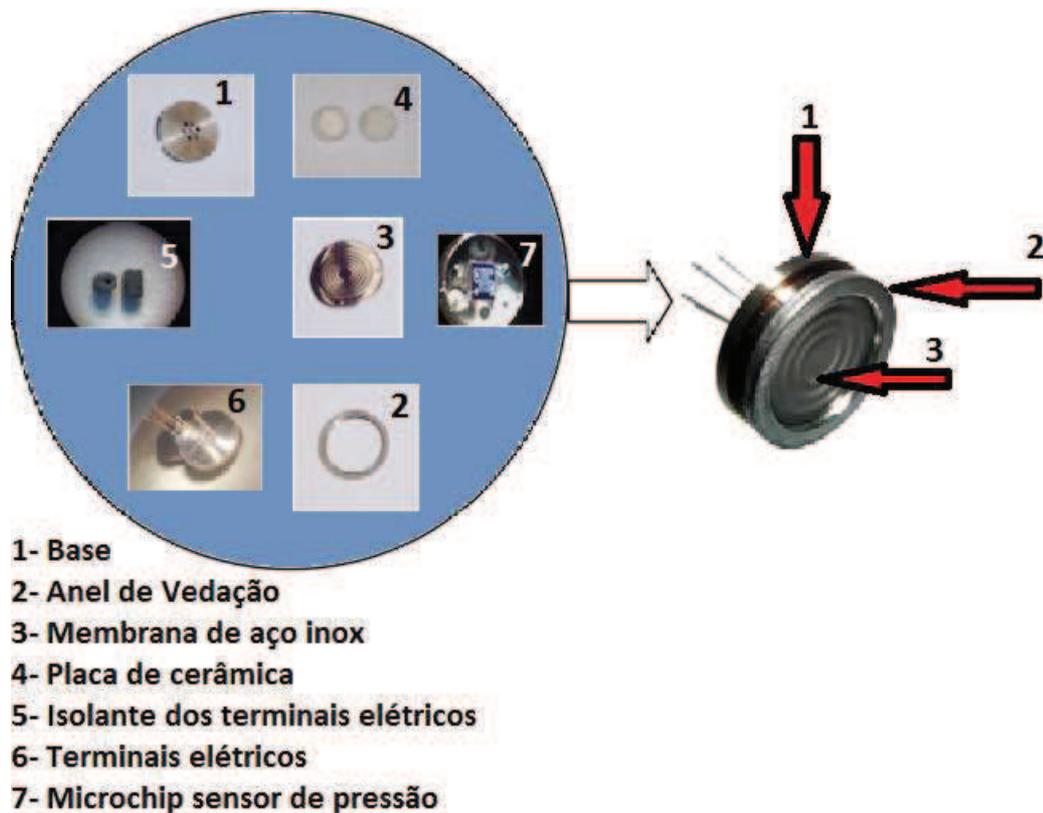


**Figura 8: fotografia indicando as dimensões do sensor de pressão fabricado.**

**Fonte: FURLAN. H**

Após as etapas mostradas e descritas nas figuras anteriores e realizados os ensaios elétricos de funcionamento, o chip sensor deverá ser encapsulado para formar o Sensor Isolado do Meio (SIM).

A Figura 9 mostra um diagrama com todos os elementos para montagem do Sensor Isolado do Meio, e evidenciando as partes da cápsula que estão em estudo neste trabalho.



**Figura 9: Ilustração através de fotografias dos componentes que fazem parte da cápsula do Sensor Isolado do Meio.**

Fonte: FURLAN, H

Esse processo de encapsulamento ilustrado na Figura 9 é feito seguindo os passos: fixação dos terminais elétricos e isolantes na capsula de aço inox. Os terminais têm a função de transmitir a corrente elétrica que alimentará o microchip sensor. Logo após é feito a colagem do sensor ao centro da peça Base que é responsável por unir todos os elementos que formam este transdutor de pressão. A membrana de aço inox 316 tem a função de transmitir a pressão exterior para o lado interno da cápsula, e esta deve ser soldada à Base com o auxílio do anel de vedação, que através do processo de solda à plasma, formam o encapsulamento do microchip sensor. Por último é feito preenchimento da cavidade do invólucro com líquido siliconado, e a cápsula é lacrada com uma esfera de aço inox 316.

A indústria de MEMS tem apresentado grandes impactos na sociedade devido à sua expansão, atendendo as demandas em várias áreas de aplicações (controle de processos, controles industriais, militares, espaciais, automotivas, transportes, médicas e de consumo), os quais exigem, na maioria das vezes, mecanismos de sensoriamento. A primeira e mais bem

sucedida aplicação comercial de MEMS é o sensor de pressão integrado monolítico, não obstante, outros desenvolvimentos MEMS, têm alcançado o mercado nos anos recentes.

Os resultados esperados ao final desta pesquisa será um método inovador de encapsulamento de sensores isolados do meio, tornando o processo de manufatura mais eficiente, simplificando o pátio fabril para encapsular sensores de pressão isolados do meio.

## 1.1 Questão de pesquisa

Como substituir a solda à plasma no processo de encapsulamento de sensores de pressão isolados do meio, utilizando o método de ajuste com interferência mecânica?

## 1.2 Objetivo

O objetivo é desenvolver uma cápsula metálica em aço inoxidável 316, que utiliza a montagem com interferência mecânica no intuito de substituir o processo de soldagem à plasma no encapsulamento de sensores de pressão isolados do meio.

Os objetivos secundários que acompanham este desenvolvimento tecnológico são os seguintes:

- Estudar o comportamento do processo de montagem com interferência;
- Projetar, elaborar e fabricar protótipos.
- Verificar as condições de solidez do conjunto montado com interferência para que suporte as pressões de aplicação do dispositivo;
- Realizar Ensaios de conformidade com normas técnicas;
- Realizar testes funcionais mecânicos;
- Identificar o grau de estanqueidade satisfatória para o perfeito funcionamento do Sensor Isolado do Meio;
- Elaborar artigos científicos para publicação, atendendo os requisitos do programa de pós-graduação do CEETPS;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com base em recentes produções científicas, nota-se que os sensores de pressão já bem conhecidos e concebidos conquistam o maior nicho do mercado de sensores. A diversidade das aplicações desse tipo de sensores oferece o crédito necessário para maiores investimentos em seu desenvolvimento tecnológico e de aplicação, (FURLAN. H, 2003).

Na literatura encontram-se autores que descrevem encapsulamento de microssensores de pressão de diversos tipos e aplicações, entre eles: F. Della Lucia et al, (2014), que estudam a viabilidade de um sensor de pressão de baixo custo, para atender as necessidades operacionais da indústria de petróleo e gás utilizando cápsulas de aço inoxidável 316 L; Lung-Tai Chen, et al (2009), desenvolveram cápsulas inovadoras de material plástico, que têm como vantagem seu tamanho, sendo até sete vezes menor que os comerciais do mesmo segmento; K.Birkelund, et al (2001), viabilizam um encapsulamento de baixo custo para sensor de alta pressão, utilizando silicone como matéria prima.

Este trabalho tem como foco o desenvolvimento de um método inovador para encapsulamento de sensores de pressão isolados do meio, utilizando apenas o ajuste com interferência, eliminando o processo de soldagem à plasma no encapsulamento de Sensores de Pressão Isolados do Meio.

A interferência é a diferença entre os diâmetros de dois corpos montados, que resulta em uma força constante que os mantém unidos. Tal força se dá pelo fato do eixo ter maior dimensão do que o furo em que será alojado. A montagem com interferência mecânica é uma técnica bem difundida e comumente utilizada em diversos campos da engenharia, sendo este um recurso para montagem de diversos tipos de elementos de máquinas, e ou outras funções de fixação, (Agostinho, et al, 2007).

O ajuste com interferência pode ser do tipo prensado longitudinal, feito com as partes em temperatura ambiente e com o auxílio de uma prensa, ou ajuste prensado transversal, feito por contração quando se aquece a peça externa, ou também por dilatação quando se resfria o eixo. O ajuste com interferência deve ser devidamente calculado para que a interferência mínima não permita o escorregamento entre as peças (condição de atrito), e que a interferência máxima não ocasione a deformação plástica, (Bulba, 2000).

Para o desenvolvimento deste trabalho serão necessários, obter dados como o limite de escoamento e módulo de elasticidade dos materiais a serem montados, temperatura de montagem, coeficiente de dilatação térmica, coeficiente de atrito, tolerâncias dimensionais e as rugosidades das superfícies de contato, pressão aplicada ao conjunto, uso de lubrificantes ou outras técnicas até agora não citadas. Um dos fatores mais importantes para que estas montagens tenham sucesso é o controle metrológico, onde na literatura este ponto é bem explanado.

Pelo sistema de ajuste ABNT pode-se normalizar o ajuste pretendido de acordo com a NBR 6158 – Sistema de tolerâncias e ajustes, assim obtendo a tolerância dimensional correta para o tipo de ajuste desejado. A aplicação desta técnica possibilitará a otimização do processo de encapsulamento para sensores de pressão.

A cápsula metálica tem a função de proteger o microchip sensor de pressão, sendo toda construída em aço inoxidável 316, que depois de passar por um processo de soldagem, se torna então uma cápsula sensora, que transmite a pressão externa, através do óleo que está armazenado hermeticamente dentro da mesma, de modo que o microssensor possa receber os estímulos necessários sem ser danificado.

Visando uma nova tecnologia para encapsulamento de SIM, e a simplificação dos equipamentos que compõem o pátio fabril, o estudo da montagem com interferência, se mostra uma solução eficaz para ser utilizada em testes, para sensores que atuam em pressões acima de 300 bar com intuito de atingir no máximo 1000 bar.

Através da criação de um elemento denominado peça Capa, que irá alojar o conjunto base e membrana, através de uma montagem com interferência mecânica, eliminando assim o anel de vedação e o processo de soldagem à plasma, até então usado. Este novo processo é uma variação de baixo custo para a manufatura dos protótipos.

## **2.1 O Processo de Encapsulamento**

Atualmente, para formar o encapsulamento se faz necessário soldar o anel de fixação no invólucro de aço inox. Essa solda é feita com tecnologia à plasma, onde se utiliza o gás tipo StarGold (White Martins). Além do custo, esse é um processo que exige mão de obra especializada, ambiente climatizado e limpo. No caso da montagem do Sensor Isolado do

Meio, é utilizado o processo chamado “Gas-Shielded Tungsten Arc Welding”, (GTAW) que usa eletrodo não consumível e o gás ionizado que atinge uma temperatura de 16.700°C, processo FAPESP – PIPE n° 02/128830.

Para substituir esse tipo de processo propõe-se, neste trabalho, a modificação do processo de encapsulamento por soldagem em um processo mais simples que é a fixação das partes da cápsula metálica pelo ajuste com interferência mecânica por contração lateral, modificando a fixação do diafragma de aço inoxidável. Para tornar possível esse encapsulamento é necessário mudar as características geométricas externas da cápsula.

Com a criação da peça Capa, a base do sensor agora será totalmente envolvida na parte superior e pelo perímetro lateral. Esta nova peça possibilitará o ajuste ideal para manter o conjunto unido substituindo a solda à plasma, apenas usando a tensão elástica dos materiais das peças capa e base.

A Figura 10 ilustra o transdutor em questão, e as partes que integram o encapsulamento, bem como o local onde foi feito o procedimento de soldagem à plasma.

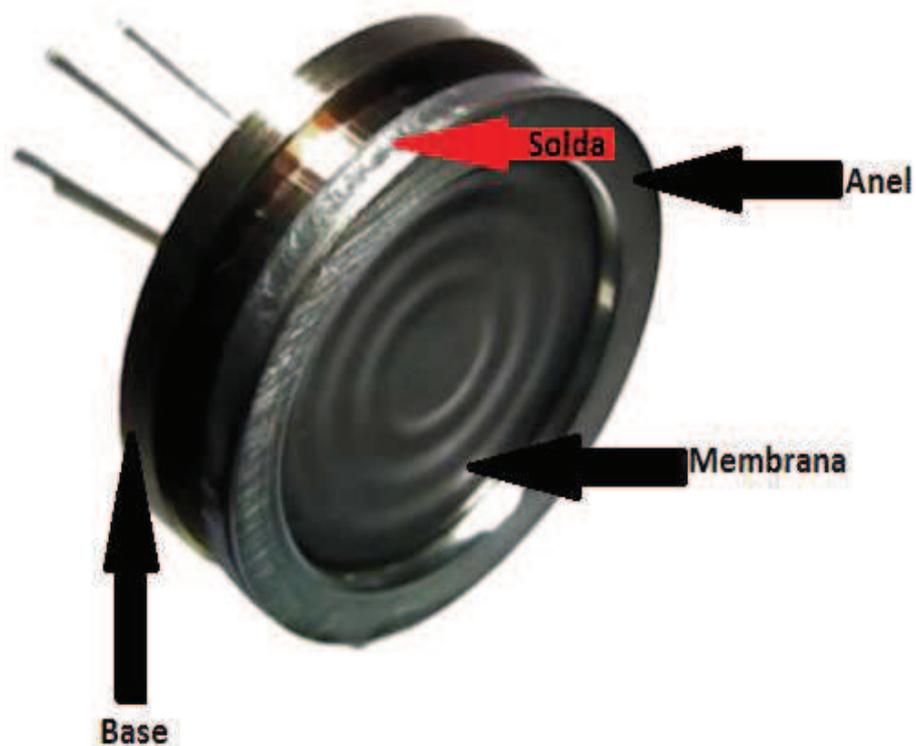
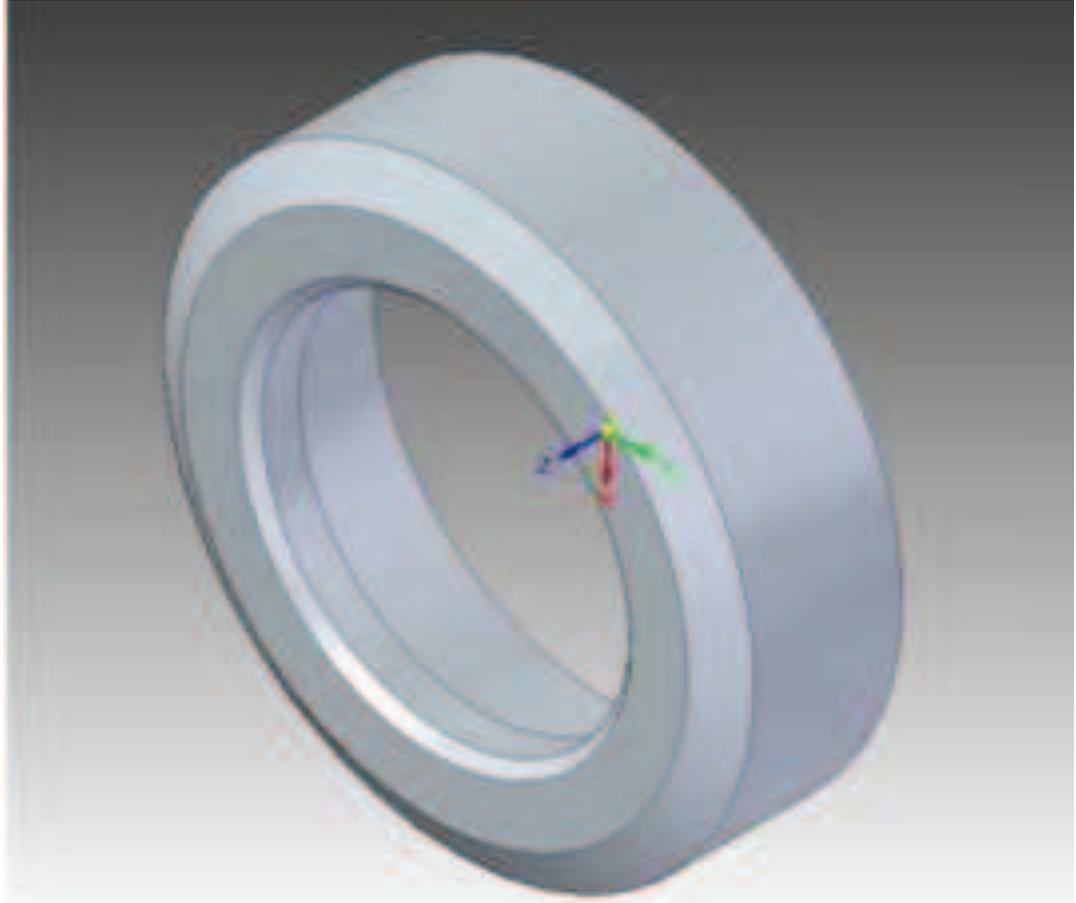


Figura 10: Fotografia do Sensor Isolado do Meio

Fonte: FURLAN, H., processo FAPESP – PIPE n° 02/128830

A Figura 11 apresenta um esboço feito em software da peça “Capa”, que deve substituir o anel de vedação no encapsulamento.



**Figura 11: Desenho da capa do Sensor Isolada do Meio feito no Solid Edge (ST6).**

**Fonte: Autor.**

A cápsula foi alterada somente em sua parte externa, de forma a não perder a semelhança com o modelo original internamente, evitando desfigurar as dimensões padronizadas e já estabelecidas no projeto anterior que segue critérios normalizados industrialmente. Esta Capa deverá suportar os esforços da interferência mecânica quando acoplada à base, não ultrapassando a tensão limite de escoamento e resistindo aos esforços das pressões aplicadas a fim de manter o conjunto unido, mantendo o invólucro da capsula vedado hermeticamente.

A Figura 12 ilustra o desenho técnico da peça Capa e suas cotas detalhando suas dimensões.

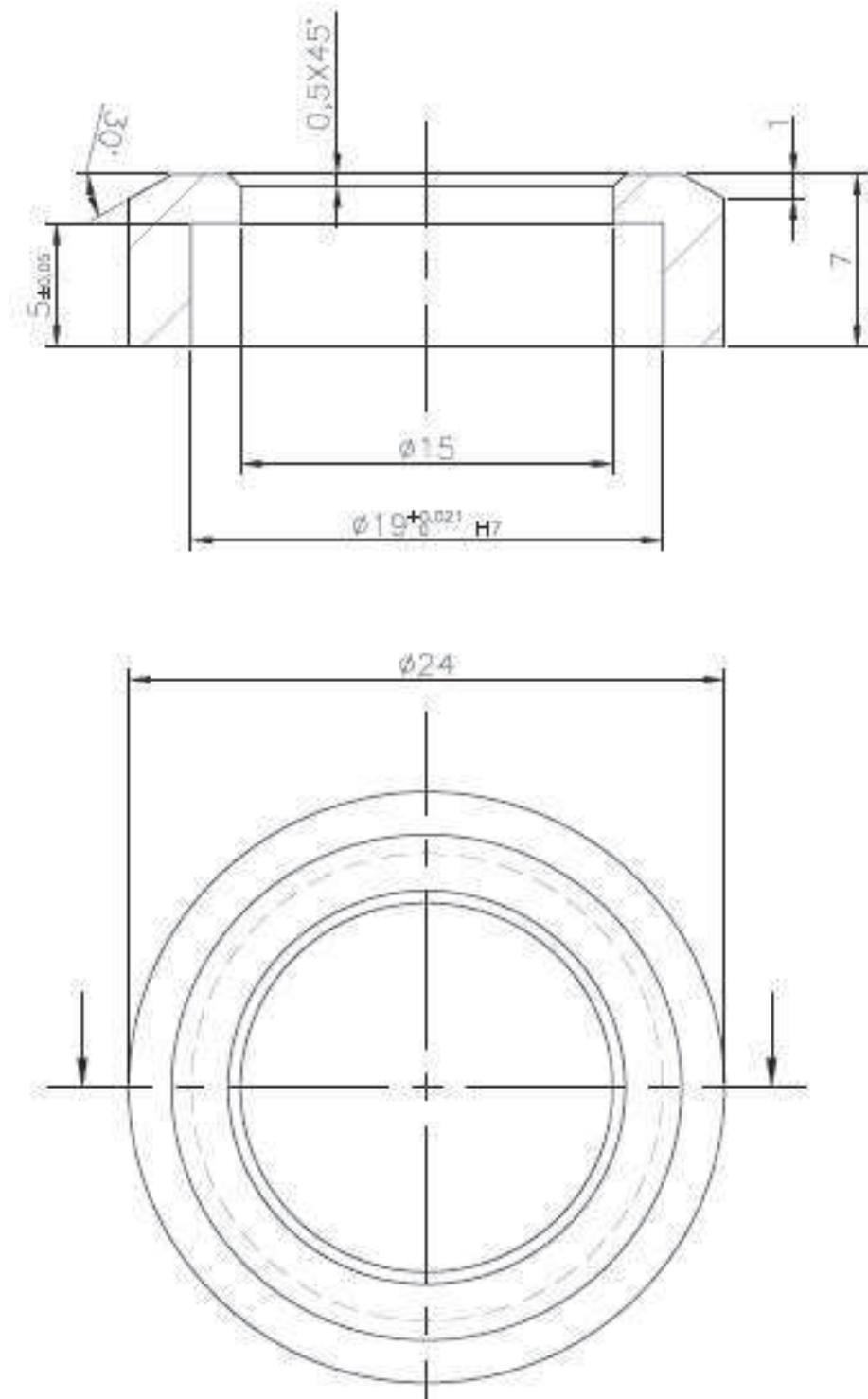


Figura 12: Desenho da capa feito no Solid Works.

Fonte: Autor.

A Figura 13 ilustra o desenho peça da Base e suas cotas com vistas de perfil, seção e detalhes do ângulo da superfície de acomodação do diafragma.

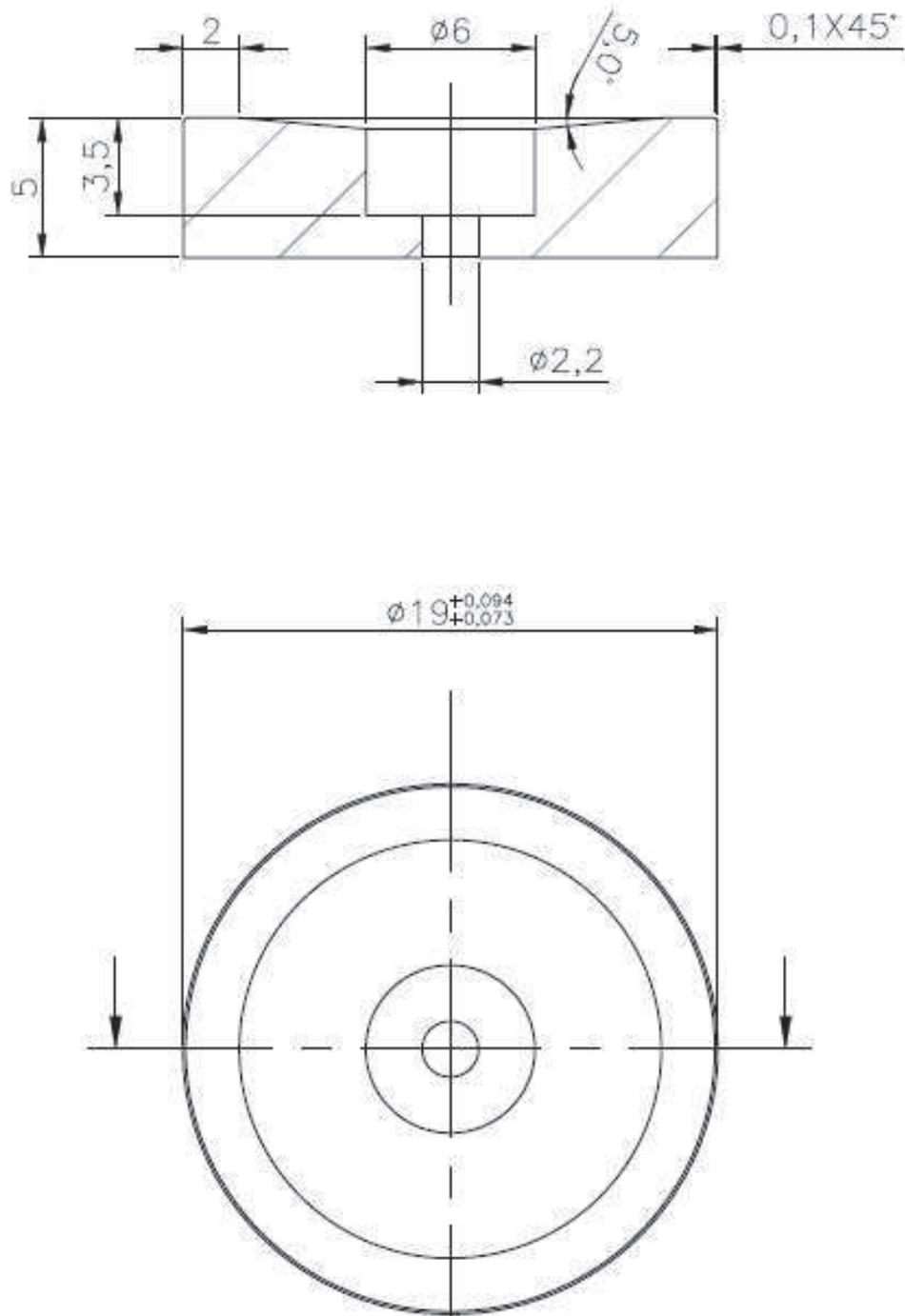


Figura 13: Desenho da Base feito em Solid Edge.

Fonte: Autor

Nota-se que comparando as medidas das peças, na Figura 12 e Figura 13 que a dimensão do diâmetro interno da Capa é menor que a dimensão do diâmetro externo da Base.

Esta diferença entre as medidas é necessária para que a pressão de contato da Capa sobre a Base forneça força de atrito suficiente para resistir aos esforços de trabalho e manter a vedação ao conjunto, quando a estrutura for submetida às pressões de trabalho.

## 2.2 A Técnica de Ajuste

Para que um elemento mecânico se acople em outro é imprescindível que suas dimensões respeitem as exigências de funcionamento, cumprindo com a sua função de trabalho dentro das estimativas do projeto. Partindo desta premissa é obtido o tipo de ajuste que pode ser um ajuste com folga, incerto ou com interferência. De acordo com o ajuste e aplicação, entram em vigor os limites de tolerância que definem o valor máximo e mínimo das dimensões destas peças, gerando uma padronização dimensional. A norma NBR 6158 regulamenta essas tolerâncias.

A Figura 14 exemplifica os tipos de ajustes, considerando o sistema Furo Base.

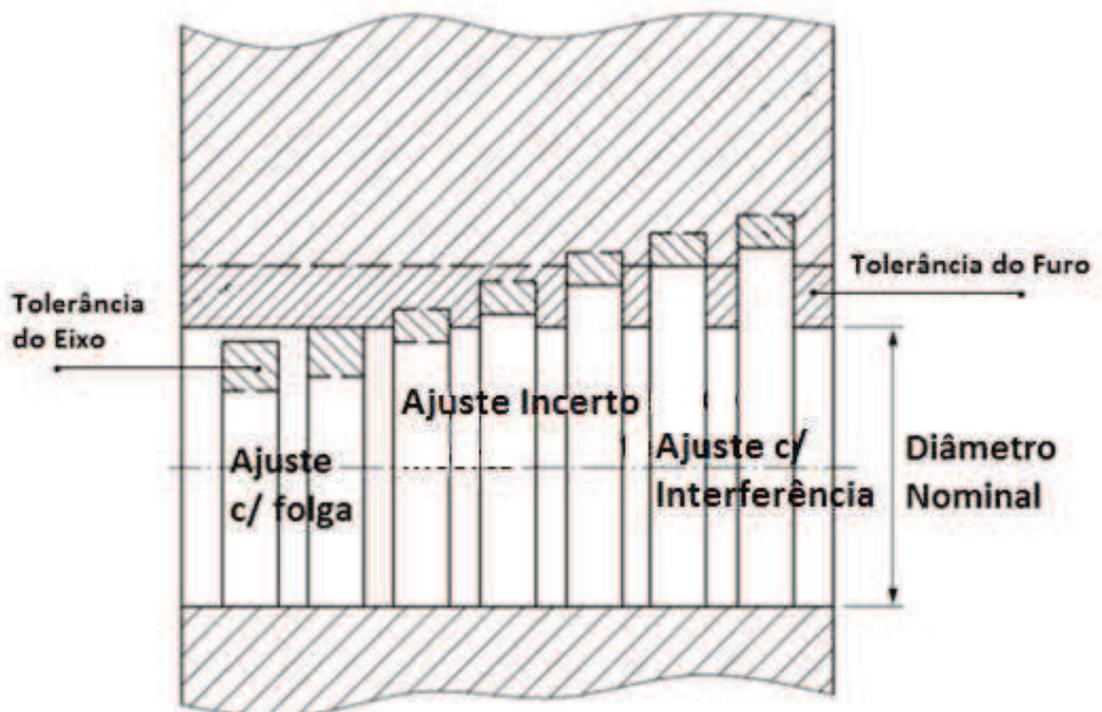


Figura 14: Imagem do Sistema de Ajustes e Tolerâncias

Fonte: Apostila de Metrologia Prof. Dr Bulba, adaptada pelo Autor

Neste trabalho foi utilizado o ajuste com interferência mecânica como uma possível solução de diminuir uma etapa no processo de encapsulamento de um microsensor de pressão.

Em um ajuste com interferência mecânica, onde o eixo e furo são acoplados, é necessário definir a interferência máxima a fim de não ocorrer a deformação plástica e a interferência mínima para não haver o deslizamento entre as mesmas, o que ocasionaria a desmontagem do conjunto. Para obter o valor da interferência máxima geralmente é utilizada a expressão de Lamée Clapeyron, que expressa a relação entre a interferência e a tensão na interface eixo e furo e esta é dada pela equação.

$$\Delta = \frac{I}{\sigma} = d \left[ \frac{de^2 + d^2}{Ee(de^2 - d^2)} + \frac{d^2 + di^2}{Ei(d^2 - di^2)} + \frac{ve}{Ee} - \frac{vi}{Ei} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

*I*: Interferência.

$\sigma$ : Tensão Limite de Escoamento.

*d*: Dimensão Nominal do Ajuste.

*de*: Diâmetro externo da peça que contém a nominal do furo (mm).

*Ee*: Módulo de Elasticidade do material que contém a nominal do furo (N/mm<sup>2</sup>).

*di*: Diâmetro interno (furo de verdade) da peça que contém a nominal do eixo (mm).

*Ei*: Modulo de Elasticidade do material que contém a nominal do eixo.

*ve*: Coeficiente de Poisson do material que contém a nominal do furo.

*vi*: Coeficiente de Poisson do material que contém a nominal do eixo.

Para utilizar a equação 1 é necessário os dados dimensionais das peças e suas propriedades mecânicas, assim como as tensões limite de escoamento, os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

As tabelas mostradas à seguir contêm as informações de qualificação, nomes utilizados em diferentes países e suas normas e as propriedades físicas e químicas do aço inoxidável 316.

A Tabela 1 mostra as especificações do aço inoxidável 316 e suas denominações dependendo das normas de diferentes países.

Tabela 1: Especificações do aço inoxidável 316, e respectivos nomes em alguns países e suas normas.

<b>AISI 316</b>		
<b>Categoria</b>	Aço	
<b>Tipo</b>	Austenítico	
<b>Classe</b>	Aço Inoxidável/ Cromo - Níquel	
<b>Designação</b>	França	AFNOR Z6 CND 17.11
	Alemanha	DIN 1.4401
	Itália	UNI X 5 CrNiMo 17 12
	Japão	JIS SUH 309, JIS SUS 316, JIS SUS Y 316
	Suécia	SS 2347
	Reino Unido	B.S. 316 S 16 , B.S. 316 S 18 , B.S. 316 S 25 , B.S. 316 S 26 , B.S. 316 S 30 , B.S. 316 S 40 , B.S. 316 S 41 , B.S. En. 58 H
	Estados Unidos da América	AMS 5524 , AMS 5573 , AMS 5648 , AMS 5690 , AMS 5691 , ASME SA182 , ASME SA193 , ASME SA194 , ASME SA213 , ASME SA240 , ASME SA249 , ASME SA312 , ASME SA320 , ASME SA358 , ASME SA376 , ASME SA403 , ASME SA409 , ASME SA430 , ASME SA479 , ASME SA688 , ASTM A167 , ASTM A182 , ASTM A193 , ASTM A194 , ASTM A213 , ASTM A240 , ASTM A249 , ASTM A269 , ASTM A276 , ASTM A312 , ASTM A313 , ASTM A314 , ASTM A320 , ASTM A358 , ASTM A368 , ASTM A376 , ASTM A403 , ASTM A409 , ASTM A430 , ASTM A473 , ASTM A478 , ASTM A479 , ASTM A580 , FED QQ-S-763 , FED QQ-S-766 , FED QQ-W-423 , MIL SPEC MIL-S-5059 , MIL SPEC MIL-S-862 , SAE 30316 , SAE J405 (30316) , UNS S31600

Fonte:

[http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_316&prop=al&Page\\_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_316&prop=al&Page_Title=AISI%20Type%20316)

A Tabela 2 ilustra a composição química do aço AISI 316, e a porcentagem em peso dos elementos construtivos.

Tabela 2: Composição Química do aço AISI 316.

<b>Composição</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Porcentagem em Peso%</b>
C	0,08
Mn	2,00
Si	1,00
Cr	16,0 – 18,0
Ni	10,0 – 14,0
P	0,045
S	0,03
Mo	2,0 – 3,0

Fonte:

[http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_316&prop=al&Page\\_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_316&prop=al&Page_Title=AISI%20Type%20316)

A Tabela 3 mostra as principais propriedades mecânicas do aço AISI 316.

Tabela 3 Propriedades Mecânicas do aço AISI 316.

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
<b>Densidade (x 1000 Kg/m<sup>3</sup>)</b>	8
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,27 – 0,30
<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	193
<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	515
<b>Tensão Limite de Escoamento (Mpa)</b>	205
<b>Alongamento (%)</b>	40
<b>Redução de área (%)</b>	50
<b>Dureza (HRB)</b>	95 (Max)

Fonte:

[http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_316&prop=al&Page\\_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_316&prop=al&Page_Title=AISI%20Type%20316)

A tabela 4 mostra as principais propriedades térmicas do aço AISI 316.

Tabela 4 Propriedades térmicas do aço AISI 316.

Propriedades térmicas	
Coeficiente de Expansão Térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	15,9
Coeficiente de Condução Térmica (W/m-K)	16,9
Calor Específico (J/kg-K)	500

Fonte:

[http://www.efunda.com/Materials/alloys/ally alloy\\_home/show\\_alloy\\_found.cfm?ID=AISI\\_Type\\_316&show\\_prop=all&Page\\_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/Materials/alloys/ally alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_Type_316&show_prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20316)

A Tabela 5 mostra a principal propriedade elétrica do aço AISI 316.

Tabela 5 Propriedades elétricas do aço AISI 316.

Propriedades Elétricas	
Resistividade Elétrica (10 <sup>-9</sup> W-m)	740

Fonte:

[http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_316&prop=all&Page\\_Title=AISI%20Type%20316](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_316&prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20316)

Os transdutores de pressão que atendem às necessidades de controle e monitoramento de pressão em ambientes com características agressivas, necessitam de materiais que resistam à estas intempéries. O aço AISI 316 que será utilizado como matéria prima para a fabricação das cápsulas deste trabalho, é o tipo mais utilizado quando se necessita de resistência à corrosão ou características inertes à exemplo da indústria alimentícia, onde os materiais das máquinas e equipamentos não podem gerar resíduos, além de ter resistência mecânica para suportar altas pressões, garantindo confiabilidade estrutural para gerar dados confiáveis.

Aplicando os valores mostrados nas tabelas e os diâmetros respectivos das peças na equação de Lamée Clapeyron, se quantifica a interferência máxima, que é o valor da diferença entre o furo e o eixo em milímetros como se segue na Equação 1.

$$\Delta = \frac{I}{205} = 19 \left[ \frac{24^2 + 19^2}{193 \times 10^3 (24^2 - 19^2)} + \frac{19^2 + 6^2}{193 \times 10^3 (19^2 - 6^2)} + \frac{0,3}{193 \times 10^3 E_e} - \frac{0,3}{193 \times 10^3 E_i} \right] \quad \text{Equação 1}$$

$$I_{\text{máx}} = 0,1126 \text{ mm}$$

Sabendo que o valor acima é a diferença máxima de dimensão entre o eixo e o furo, a partir deste valor haverá a deformação plástica do conjunto montado. Caso ocorra tal deformação, poderá não mais haver a tensão suficiente entre os corpos para manter o conjunto unido.

Geralmente o ajuste por interferência mecânica é utilizado em eixos para transmitir alto torque, sendo este o fator principal ao cálculo e para o dimensionamento, frequentemente utilizado na área da engenharia. A interferência mínima é comumente calculada através da equação 2.

$$I_{min} \geq \sigma_{atrito} \times \Delta \quad \text{Equação 2}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão de atrito necessária na interface eixo furo para que não ocorra o deslizamento entre as peças acopladas. O cálculo da Tensão de atrito é dado pela equação 3.

$$\Sigma_{atrito} = \frac{2T}{\mu \pi d^2 L} \quad (N/mm^2) \quad \text{Equação 3}$$

Onde;  $T$ , é o torque na interface do eixo/furo (N . mm) e  $\mu$ ; coeficiente de atrito,  $D$ ; o diâmetro nominal,  $L$ ; o comprimento do ajuste entre as peças.

Porém neste caso de encapsulamento, não será aplicado momento torçor sobre este conjunto. A cápsula receberá compressão na parte frontal, que será transmitida pelo óleo no invólucro, que por sua vez tenta expandir todo o conjunto com tendência a desmontar a cápsula, logo a equação 3 não proverá resultados para este desenvolvimento, pois o torque é igual a zero. Substituindo e aplicando o resultado nas fórmulas obtém-se zero, o que indica que não será possível obter o valor de interferência mínima utilizando a equação 2.

O conhecimento da interferência mínima é necessário para poder determinar os campos de tolerâncias, a fim de normalizar o ajuste e padronizar a confecção das peças a serem montadas.

A solução adotada para determinar a interferência mínima, foi substituir a tensão limite de escoamento na equação de Lamée Clapeyron, pela tensão necessária para resistir a desmontagem do conjunto quando este é exigido no maior esforço de trabalho. A pressão máxima sobre o sensor em regime de trabalho é de 1000 bar, sendo assim é possível determinar a força através da Equação 5.

A pressão externa sobre a membrana de aço inox é transmitida para dentro do invólucro pressionando o óleo que por sua vez também executará o mesmo trabalho

pressionando a peça Base, resultando em uma força que tende a desmontar o conjunto. Como a membrana não oferece resistência e o óleo não altera seu volume significativamente com a aplicação da pressão, o único fator de resistência para manter o conjunto unido é a pressão de contato entre as áreas da montagem por interferência, portanto assume-se que a área superior,  $A_s$ , da peça Base é quem recebe este estímulo. O diâmetro de 19 milímetros foi estabelecido para o cálculo da área usando a equação:

$$A_s = \pi r^2 \quad \text{Equação 4}$$

Deste modo, a força máxima de trabalho sobre a parte superior da peça Base é dada pela equação:

$$F = P \times A_s \quad \text{Equação 5}$$

$$F = (1000 \text{ Bar} \cdot 0,0101972 \text{ kgf/mm}^2) \times \pi \cdot 9,5 \text{ mm}^2$$

$$F = 2891,1992 \text{ kgf} = 28352,9786 \text{ N}$$

Determinada a força máxima atuante, pode-se deduzir que a tensão,  $\sigma$ , mínima do ajuste está relacionada à força máxima na área de contato entre as peças acopladas. As equações a seguir demonstram o raciocínio:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $A$  é a área de contato entre as peças acopladas, calculada através da equação 7, onde  $r$  é o raio do diâmetro nominal e  $L$  é o comprimento do contato entre as peças.

$$A = 2\pi \cdot r \cdot L \quad \text{Equação 7}$$

Aplicando a equação 6 encontra-se o valor de tensão entre as peças.

$$\sigma = \frac{28352,9786 \text{ N}}{(2\pi \times 9,5 \times 5) \text{ mm}^2} \quad \sigma = 95,003 \text{ N/mm}^2 = 95 \text{ Mpa} \quad \text{Equação 6}$$

Substituindo a tensão limite de escoamento pela tensão máxima atuante, na equação de Lamée Clapeyron será possível determinar a interferência mínima.

$$\Delta = \frac{l}{95} 19 \left[ \frac{24^2 + 19^2}{193 \times 10^3 (24^2 - 19^2)} + \frac{19^2 + 6^2}{193 \times 10^3 (19^2 - 6^2)} + \frac{0,3}{193 \times 10^3 E_e} - \frac{0,3}{193 \times 10^3 E_i} \right] \quad \text{Equação 8}$$

$$I_{min} = 0,05218 \text{ mm}$$

Conhecidos os valores das interferências máxima e mínima pode se denominar os campos de tolerâncias segundo a norma NBR 6158. Neste caso o ajuste entre a capa e a base é de **19 H7** para o diâmetro do furo da capa, e **19 z7** para o diâmetro externo da base.

Com o intuito de verificar se o aperto entre as peças Capa e Base vai suportar os esforços de trabalho, utiliza-se a equação 9, que indica a pressão de contato dependendo do valor de interferência real que o conjunto apresenta.

$$P = \frac{E \cdot \delta r \cdot (r_o^2 - R^2) \cdot (R^2 - r_i^2)}{2 \cdot R^3 \cdot (r_o^2 - r_i^2)} \quad \text{Equação 9}$$

De acordo os cálculos de interferência, têm-se  $I_{Máx} = 0,1126$  mm e  $I_{mín} = 0,05218$ mm, utilizando a equação 9 verifica-se a pressão de contato sendo  $P_{máx} = 204,9901$  MPa, e  $P_{Mín} = 94,9945$  MPa. Estes valores corroboram com a teoria descrita acima onde  $P_{Max}$ , praticamente, se iguala a tensão limite de escoamento, e  $P_{mim}$ , com a tensão mínima entre as peças, na equação 6.

Uma maneira de se comprovar essa pressão de contato entre as superfícies foi demonstrada por R. Lewis, et al (2003). É um método de ensaio não destrutivo que utiliza técnicas de ultrassom para verificar o quão distantes estas superfícies se encontram uma da outra em função da rugosidade entre estas.

Segundo Irappa Sogalad, et al.,(2012) a cilíndricidade dos corpos não produz um padrão que possa ter maior eficiência no carregamento de interferência mecânica entre os corpos montados. H. Boutoutaou, et al (2011) observaram que corpos com defeitos na interface de contato, atingem bons resultados de pressão de aperto, reduzindo os custos com a usinagem das partes, porém é necessário a modelagem de elementos finitos para se ter precisão da pressão média de contato.

Yang et all,(2001) analisaram a influência da rugosidade no aperto do ajuste com interferência, e defendem a importância do contato de pico a pico, sendo este, o fator o qual exerce o aperto da interferência, salientando que o processo comum de usinagem seria suficiente para tal ajuste, o que dispensa processos mais caros como a retífica e polimento, comumente utilizados no intuito de obter melhores resultados de aperto.

Estes estudos corroboram com o processo de produção proposto neste trabalho visando procedimentos menos complexos.

As peças Capa e Base serão montadas com a técnica de ajuste prensado transversal, que pode ser feito através da dilatação, que consiste em resfriar o eixo (peça Base) de modo a diminuir o diâmetro externo para facilitar a montagem, e este se dilata à temperatura ambiente prensando o corpo externo. De acordo com Irappa Sogalad, e Subramanya Udupa, (2010), o efeito da criogenia no ajuste por dilatação, tem bons resultados de pressão de contato, porém este processo pode causar a fratura dos isolantes elétricos que estão alojados na peça Base da cápsula, sendo inviável esta técnica para este trabalho.

Outra forma de ajuste, é o prensado transversal por contração, que ocorre após o aquecimento da peça Capa, que tem suas dimensões alteradas devido à dilatação, facilitando a montagem do conjunto, que ao perder calor, contrai se fixando na peça Base.

O cálculo da temperatura ideal para dilatação da peça se faz através da equação 10, (Bulba 2009, pg 60).

$$\Delta t = \frac{Imáx}{d \times \alpha_e} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$Imáx$  : Interferência máxima obtida a partir do ajuste normalizado selecionado.

$\alpha_e$ : Coeficiente de dilatação térmica da peça que contém a nominal do furo.

$d$ : Diâmetro nominal do ajuste.

$$\Delta t = \frac{0,1126mm}{19 \times 15,9 \times 10^{-6}} \quad \Delta t = 372,72^\circ C$$

A partir deste ponto onde se encontram todos os dados necessários para fabricação e montagem, pode-se dar início a parte experimental.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como base o método experimental quantitativo, fundamentado na teoria dos conceitos de interferência mecânica, fontes térmicas, formas geométricas, fundamentação metrológica, desenvolvimento e fabricação dos dispositivos e ensaios de caracterização.

Foram pesquisados artigos científicos nas áreas de mecânica aplicada a ajustes com interferência, MEMS, processos de encapsulamento de microdispositivos, técnicas e equipamentos de caracterização mecânica.

Para desenvolver este trabalho faz-se necessário conhecer os conceitos, tipos de ajustes normalizados, assim como as propriedades do Aço AISI 316, utilizadas para calcular as interferências máxima e mínima do ajuste ideal de montagem desta nova cápsula.

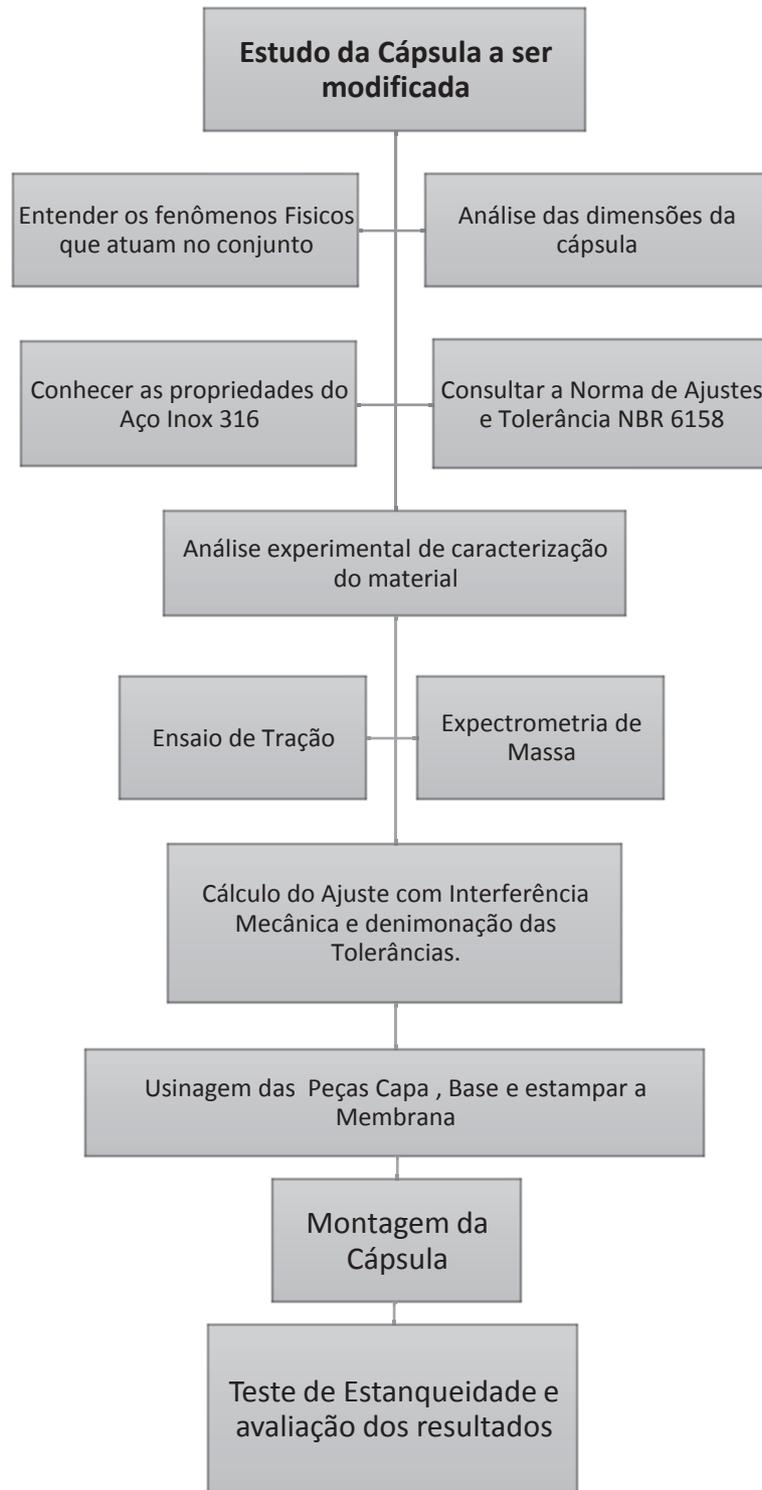
Através da equação de Lamée Calpeyron (Equação1), pode-se obter o valor da interferência máxima e interferência mínima, e de acordo com a Norma NBR-6158, pode-se normalizar o ajuste dando os campos de tolerâncias ideais para a fabricação das partes que compõem o protótipo.

Para fabricar estas peças que compõem a cápsula metálica, é imprescindível ter o conhecimento sobre as técnicas do processo de usinagem, assim como os procedimentos de fabricação e de usinagem de metais, maquinário compatível por precisão dimensional e potência suficiente para executar a confecção dos protótipos.

Observa-se que durante o desenvolvimento deste trabalho ocorreram adaptações tanto de maquinário e ferramental, quanto das técnicas empregadas, a fim de obter melhores resultados.

Com o intuito de elucidar a ordem de execução deste projeto, elaborou-se um organograma que exemplifica a sequência de desenvolvimento e execução.

A Figura 15 mostra o Organograma de desenvolvimento e execução deste trabalho.



**Figura 15: Imagem do organograma de desenvolvimento**

**Fonte: Autor**

## **4 EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTOS E MAQUINÁRIOS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.**

Para caracterizar o aço inox 316 foram utilizados diversos equipamentos com intenção de obter valores mais apurados das propriedades mecânicas, e desta forma refinar os cálculos que anteriormente foram feitos em função de valores tabelados.

Neste trabalho o uso de instrumentos metrológicos é de suma-importância, assim como a confiabilidade e precisão para poder controlar as dimensões calculadas garantindo a padronização das dimensões das peças usinadas e conseqüentemente, resultando em ajustes com interferência dentro dos padrões estabelecidos. Para manter o padrão de ajuste necessário deste trabalho utilizaram-se maquinários que atendem os requisitos de precisão e confiabilidade para a perfeita avaliação do material e confecção das peças, ferramentas e dispositivos para auxiliar a montagem e, ou outras etapas deste desenvolvimento tecnológico.

A TABELA 10 (Anexo 1), lista os instrumentos metrológicos, equipamentos, máquinas e outros recursos utilizados durante o desenvolvimento do projeto.

### **4.1 Ensaios de caracterização do Aço AISI 316.**

Conforme mencionado, a cápsula deste trabalho é construída em Aço Inox 316, sendo este material comprado pela Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE), com certificação. Uma cópia do certificado do aço se encontra no Anexo 2 deste trabalho.

A fim de verificarmos a real composição da liga do aço, utilizou-se o Espectrômetro de Massa da FATEC-SP, mostrado na Figura 16.



**Figura 16: Fotografia do Espectrômetro de Massa FATEC-SP.**

**Fonte: Autor**

Na Figura 17 se visualiza o ensaio em andamento. O resultado deste ensaio se encontra no Anexo 3.



**Figura 17: Fotografia do ensaio de espectrometria.**

**Fonte: Autor**

Foram feitos ensaios de tração para se comparar os valores reais com os tabelados e, assim, trabalhar com os valores do Módulo de Elasticidade e Limite de Escoamento que a liga apresenta. Entretanto, houve problemas no momento do ensaio e conseqüentemente não foram obtidos resultados confiáveis. Tal problema ocorreu devido ao aço inox se deformar mais do que 50% do seu comprimento inicial, ficando o extensômetro sem curso para captar a parte final do ensaio. Mesmo com a troca do extensômetro por outro modelo, o qual se utiliza em polímeros e que tem maior curso de trabalho, não garantiram a exatidão deste ensaio.

A Figura 18 ilustra os corpos de prova usinados para este ensaio.



**Figura 18: Fotografia dos Corpos de Prova**

**Fonte: Autor**

O ensaio ocorreu no Laboratório de Materiais da FATEC-SP, em uma Máquina Universal de Ensaio (MUT). A Figura 19 apresenta a máquina durante o ensaio, já com o corpo de prova inserido e o extensômetro acoplado ao corpo de prova.



**Figura 19: Fotografia da Máquina Universal de Ensaios FATEC-SP.**

**Fonte: Autor**

O problema ocorrido se deu pelo fato de o extensômetro ter um curso de abertura de 50 mm, sendo que o material do Corpo de Prova se alongou mais do que este comprimento. Foi usado outro extensômetro, em busca de continuar o ensaio com os outros Corpos de Prova 2 à 5, este tipo de extensômetro serve aos ensaios de polímeros. Houve dispersão dos dados, ficando os resultados diferentes dos valores normalizados, demonstrando que o equipamento não apurou corretamente a variação de comprimento durante a fase elástica do ensaio. O que não possibilitou constatar o Módulo de Elasticidade e o Limite de escoamento.

A Figura 20 mostra o extensômetro do primeiro ensaio.



**Figura 20: Fotografia do extensômetro usado no primeiro ensaio.**

**Fonte: Autor**

A Figura 21, o extensômetro com maior curso usado em polímeros, usado nos demais ensaios.

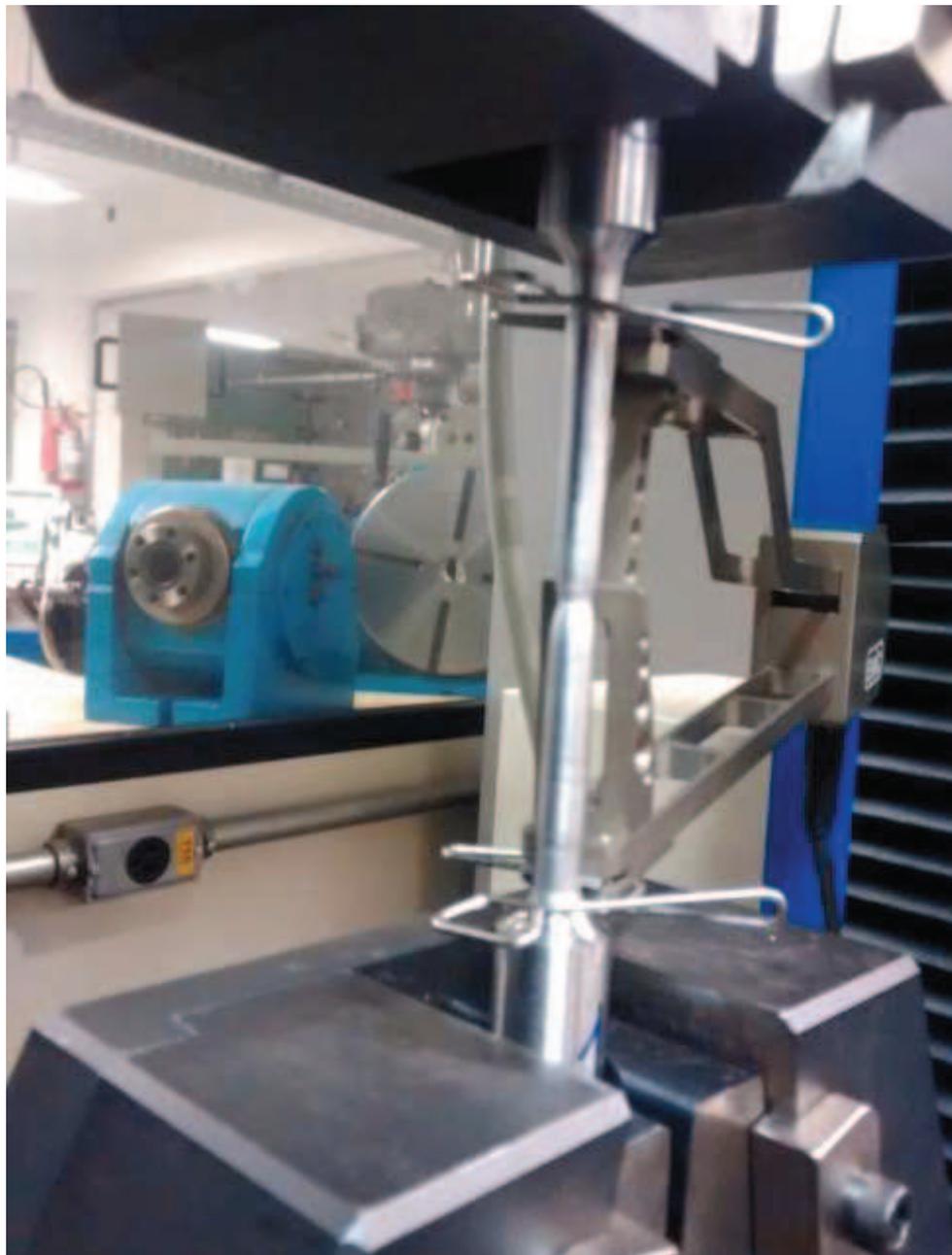


**Figura 21: Fotografia do extensômetro usado nos ensaios 2, 3, 4 e 5.**

**Fonte: Autor**

Alterando as dimensões do corpo de prova segundo a NBR 6892, de forma que seu alongamento total e ruptura não ultrapassassem os 45 mm de comprimento, foi realizado outro ensaio o qual foi possível caracterizar o módulo de elasticidade e limite de escoamento. Dados, estes, essenciais para a obtenção das interferências máxima e mínima do ajuste.

A Figura 22 mostra um corpo de prova no momento do ensaio, onde se nota o empescoamento no meio da peça, antes de vir à ruptura.



**Figura 22: Fotografia do corpo de prova sendo tracionado**

Fonte: Autor

O módulo de elasticidade ( $E$ ) foi gerado diretamente no relatório da máquina universal de testes. O laudo obtido pela (MUT) está disponível no Anexo 4. O limite de escoamento ( $\sigma$ ), foi gerado através de gráficos no software Origin, disponível no Anexo 5

Os valores de limite de escoamento e módulo de elasticidade se deram próximos aos normalizados, por tanto, visando à padronização e redução de custo aos futuros processos de manufatura de uma produção seriada e, ou reprodução deste trabalho, os valores adotados para o cálculo do ajuste com Interferência foram os dados da Tabela 3.

#### 4.2 Processos de Fabricação dos Protótipos

As cápsulas foram usinadas em um Torno de Comando Numérico Computadorizado (CNC), localizado no Laboratório de CNC da FATEC-SP, mostrado na Figura 23. O torno CNC é uma Máquina Ferramenta que possibilita a produção de larga escala, diminuindo custos no processo de manufatura.

O uso deste equipamento favoreceu a confiabilidade das medidas das peças, mantendo o padrão de ajuste calculado para todas as amostras, assim como as outras dimensões do corpo da cápsula.



Figura 23: Fotografia do Torno CNC - FATEC-SP.

Fonte: Autor

Com o intuito detalhar os processos de usinagem destas peças, elaborou-se uma tabela que descreve as etapas e mostra em pequenas figuras passo a passo esta manufatura. A Tabela 11, que está disponível no Anexo 6, foi fundamentada no processo de usinagem das peças Capa e Base, que foram feitas em um Torno Universal, em razão de publicação de três trabalhos apresentados em eventos no ano de 2014 (Penalver et al). Este processo produtivo é idêntico ao do torno CNC, em virtude desta máquina trabalhar com óleo solúvel em abundância, para refrigerar as peças e ferramentas de corte, inviabilizou-se a gerar imagens destes processos.

Foram usinados dois lotes de cápsulas. Primeiramente um lote com 12 amostras e após os testes, um segundo lote contendo 18 amostras. Todas as peças seguiram os mesmos critérios de produção e medição.

Os diâmetros internos das peças Capa que compõe o ajuste 19 H7, foram medidos com micrômetro interno de três contatos, que está indicado na Tabela 9, e os diâmetros externos do ajuste 19 z7, com micrômetro externo, também referenciado na Tabela 9. Além da medição de conferência no torno CNC durante a usinagem, foram executadas mais três medições no Laboratório de Metrologia, na temperatura ambiente de 20° C com os mesmos instrumentos. As peças foram posicionadas de modo que favoreça a execução desta medição, minimizando o fator de erro humano.

Na Tabela 6 encontram-se os valores da peça Capa medidos no laboratório de metrologia com suas respectivas médias aritméticas

Tabela 6: Contém os valores das medições da peça Capa, e as suas respectivas médias

Peça Capa	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
Lote 1				
1	19,020 mm	19,020 mm	19,020 mm	19,020 mm
2	19,015 mm	19,016 mm	19,014 mm	19,015 mm
3	19,003 mm	19,002 mm	19,003 mm	19,002 mm
4	19,003 mm	19,002 mm	19,003 mm	19,002 mm

5	19,017 mm	19,017 mm	19,018 mm	19,017 mm
6	19,020 mm	19,021 mm	19,021 mm	19,020 mm
7	19,018 mm	19,015 mm	19,017 mm	19,016 mm
8	19,008 mm	19,010 mm	19,008 mm	19,008 mm
9	19,017 mm	19,017 mm	19,018 mm	19,017 mm
10	19,006 mm	19,006 mm	19,005 mm	19,005 mm
11	19,006 mm	19,005 mm	19,007 mm	19,006 mm
12	18,994 mm	18,993 mm	18,993 mm	18,993 mm
Lote 2				
1	18,997 mm	18,996 mm	18,997 mm	18,996 mm
2	19,008 mm	19,007 mm	19,007 mm	19,008 mm
3	19,008 mm	19,005 mm	19,007 mm	19,006 mm
4	19,022 mm	19,021 mm	19,019 mm	19,020 mm
5	19,020 mm	19,019 mm	19,021 mm	19,020 mm
6	19,012 mm	19,011 mm	19,011 mm	19,011 mm
7	19,014 mm	19,012 mm	19,013 mm	19,013 mm
8	19,015 mm	19,020 mm	19,017 mm	19,017 mm
9	19,024 mm	19,025 mm	19,022 mm	19,023 mm
10	18,999 mm	19,001 mm	19,002 mm	19,000 mm
11	19,001 mm	19,001 mm	19,002 mm	19,001 mm
12	19,000 mm	18,999 mm	18,998 mm	18,999 mm
13	18,993 mm	18,992 mm	18,993 mm	18,992 mm
14	18,993 mm	18,996 mm	18,995 mm	18,994 mm
15	18,994 mm	18,993 mm	18,995 mm	18,994 mm
16	18,986 mm	18,987 mm	18,987 mm	18,996 mm

17	18,985 mm	18,987 mm	18,985 mm	18,985 mm
18	19,043 mm	19,043 mm	19,043 mm	19,043 mm Acima do padronizado

Fonte: Autor

Na tabela 7 são apresentados os valores da peça Base medidas no laboratório de metrologia e suas respectivas médias aritméticas.

Tabela 7: Contém os valores das medições da peça Base e as suas respectivas médias.

Peça Base	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
1	19,10 mm	19,10 mm	19,10 mm	19,10 mm
2	19,10 mm	19,10 mm	19,10 mm	19,10 mm
3	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm
4	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm
5	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm
6	19,085 mm	19,085 mm	19,09 mm	19,086 mm
7	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm
8	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm
9	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm
10	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm
11	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm	19,09 mm
12	19,09 mm	19,085 mm	19,09 mm	19,088 mm
Lote2				
1	19,070 mm	19,070 mm	19,070 mm	19,070 mm
2	19,075 mm	19,075 mm	19,078 mm	19,076 mm
3	19,075 mm	19,080 mm	19,078 mm	19,076 mm

4	19,080 mm	19,078 mm	19,078 mm	19,079 mm
5	19,085 mm	19,080 mm	19,085 mm	19,083 mm
6	19,088 mm	19,085 mm	19,085 mm	19,086 mm
7	19,085 mm	19,080 mm	19,085 mm	19,083 mm
8	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm	19,095 mm
9	19,090 mm	19,090 mm	19,090 mm	19,090 mm
10	19,090 mm	19,090 mm	19,090 mm	19,090 mm
11	19,085 mm	19,088 mm	19,085 mm	19,086 mm
12	19,085 mm	19,085 mm	19,088 mm	19,086 mm
13	19,088 mm	19,085 mm	19,085 mm	19,086 mm
14	19,075 mm	19,075 mm	19,075	19,075 mm
15	19,085 mm	19,085 mm	19,085 mm	19,085 mm danificada
16	19,110 mm	19,110 mm	19,110 mm	19,110 mm Acima do padronizado
17	19,060 mm	19,060 mm	19,060 mm	19,060 mm Abaixo do padronizado
18	19,100 mm	19,100 mm	19,100 mm	19,100 mm Acima do padronizado

Fonte: Autor

A partir das tabelas 6 e 7 tornou-se evidente a confiabilidade dos processos de usinagem e metrologia.

### 4.3 Montagem da Cápsula.

O ajuste normalizado segue tolerâncias máximas e mínimas para ambos os diâmetros que compõe o acoplamento. Com o intuito de verificar a padronização do ajuste deste método, foi criada a Tabela 8, que contém as médias de diâmetros das peças Capa e Base e, ao subtrair estes valores, resulta no valor de Interferência de cada conjunto que será montado. A cada montagem tem-se uma pressão de contato específica dada em Mega Pascal conforme projetado. Salienta-se que as peças foram nomeadas de 1 à 12 aleatoriamente e, desta forma, serão montadas em pares com as peças de mesmo número de referência. Este mesmo método foi utilizado no lote 2, exceto para as peças de número 16, 17 e 18, Base e Capa, que foram postas em conjunto propositalmente, devido à suas dimensões que estão fora de padrão de tolerância especificado pela norma, porém dentro da taxa de aperto ideal para o funcionamento.

Na Tabela 8 encontram-se os valores médios de diâmetros, interferência e pressão de contato atuante em cada conjunto

Tabela 8: Exemplifica o valor da Interferência de cada conjunto.

<b>Peça</b>	<b>Média do diâmetro da Base</b>	<b>Média do diâmetro da Capa</b>	<b>Interferência atuante no conjunto</b>	<b>Pressão de contato em MPa</b>
1	19,10 mm	19,020 mm	0,08mm	145,6413 MPa
2	19,10 mm	19,015mm	0,085mm	154,7438 MPa
3	19,095 mm	19,013 mm	0,082 mm	149,2823 MPa
4	19,095 mm	19,002 mm	0,093 mm	169,3080 MPa
5	19,09 mm	19,017 mm	0,073 mm	132,8976 MPa
6	19,086 mm	19,020 mm	0,066 mm	120,1540 MPa
7	19,095 mm	19,016 mm	0,079 mm	143,8207 MPa
8	19,09 mm	19,008mm	0,082 mm	149,2823 MPa

9	19,09 mm	19,017 mm	0,073 mm	132,8976 MPa
10	19,09 mm	19,005 mm	0,085 mm	154,7438 MPa
11	19,09 mm	19,006 mm	0,084 mm	152,9233 MPa
12	19,088 mm	18,993 mm	0,095 mm	172,9490 MPa
Lote 2				
1	19,070 mm	18,996 mm	0,074 mm	134,7182 MPa
2	19,076 mm	19,008 mm	0,068 mm	123,7951 MPa
3	19,077 mm	19,006 mm	0,071 mm	129,2566 MPa
4	19,078 mm	19,020 mm	0,058 mm	105,5899 MPa
5	19,083 mm	19,020 mm	0,063 mm	114,6925 MPa
6	19,086 mm	19,011 mm	0,075 mm	136,538 MPa
7	19,083 mm	19,013 mm	0,070 mm	127,4361 MPa
8	19,095 mm	19,013 mm	0,078 mm	142,0002 MPa
9	19,090 mm	19,023 mm	0,067 mm	121,9745 MPa
10	19,090 mm	19,000 mm	0,090 mm	163,8464 MPa
11	19,086 mm	19,001 mm	0,085 mm	154,7438 MPa
12	19,086 mm	18,999 mm	0,087 mm	158,3849 MPa
13	19,086 mm	18,992 mm	0,094 mm	171,1285 MPa
14	19,075 mm	18,994 mm	0,081 mm	147,4618 MPa
15	19,085 mm	18,994 mm	0,091 mm	165,6669 MPa
16	19,110 mm	18,986 mm	0,124 mm	225,7440 MPa
			Acima da interferência máxima	
17	19,060 mm	18,985 mm	0,075 mm	136,5387 MPa
18	19,100 mm	19,043 mm	0,057 mm	103,7694 MPa

Fonte: Autor

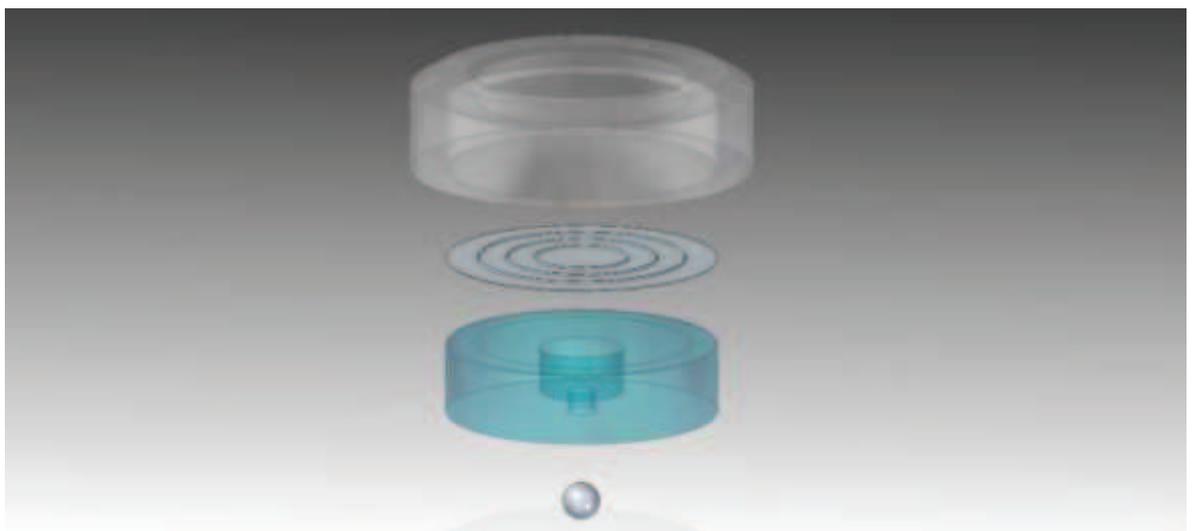
A Figura 24 mostra as partes que formam a cápsula: Capa 1, Base 2, Membrana de aço inox 3 e a esfera de vedação 4.



**Figura 24: Fotografia das partes que compõem a cápsula.**

**Fonte: Autor**

Na Figura 25 pode-se observar os detalhes do processo construtivo, através de um desenho feito no software Solid Edge, para exemplificar a montagem do conjunto que constitui a cápsula.



**Figura 25: Imagem criada em Solid Edge.**

**Fonte: Autor**

As peças Capa são colocadas em um forno para serem aquecidas. Devido às perdas térmicas que ocorrem quando a porta do forno é aberta e o fato da peça perder calor para o ambiente quando é transportada para a montagem, a temperatura do forno foi regulada em 390° C, 20° C acima da temperatura calculada. Desta forma a peça Capa teria dilatado o suficiente, minimizando os esforços de montagem e evitando que as partes do contato do ajuste fossem danificadas pelo atrito no momento da prensagem.

Após o aquecimento do forno foi determinado um tempo de espera de 60 minutos para que as peças estivessem em equilíbrio térmico com o forno e assim, manterem a temperatura próxima ao valor calculado, para o momento da montagem.

A Figura 26 mostra o Forno e as peças Capa, dispostas em ordem numérica para a montagem.



**Figura 26: Fotografia do Forno do Laboratório de Materiais FATEC-SP.**

**Fonte: Autor**

Foi construído um gabarito para realizar a montagem da cápsula, este tem a função de centralizar e distribuir a força aplicada pela prensa de modo a fornecer um encaixe preciso das peças.

A Figura 27 mostra este gabarito já com uma cápsula montada.



**Figura 27: Fotografia do gabarito de montagem das cápsulas.**

**Fonte: Autor**

A figura 28 mostra o conjunto prensa gabarito e cápsula.



**Figura 28: Fotografia da Prensa do Laboratório de Materiais FATEC-SP.**

**Fonte: Autor**

O processo de montagem se procede como descrito: retira-se a peça Capa aquecida do forno e antes que a temperatura da peça comece baixar, instala-se a membrana corrugada de aço inox dentro da Capa, alinha-se a peça Base sobre a Capa e, rapidamente, leva-se este conjunto abaixo do atuador da prensa, para se aplicar pressão até o conjunto estar totalmente embutido, gerando uma força de 40 KN sobre o conjunto. Aguarda-se até que as peças entrem em equilíbrio térmico e estejam à temperatura ambiente para retirá-las do gabarito. Este processo deve ser repetido para cada conjunto, nas mesmas sequências de etapas.

Entretanto, o método de montagem descrito anteriormente sofreu alterações com o intuito de obter melhores resultados. A perda de calor da peça Capa foi maior que o esperado, fazendo-a contrair antes do momento da prensagem e, desta forma, não atendendo às especificações deste trabalho. Para se quantificar essa perda em função do tempo foi utilizado um termopar tipo K e um cronômetro

Não podendo ultrapassar os 400 °C, devido às mudanças de fase do aço inox, o aumento de temperatura não pôde ser utilizado como solução. A fim de minimizar as perdas de calor ao se retirar as peças do forno, foram criados quatro novos gabaritos de montagem, estes feitos em ferro fundido, e aquecidos juntamente com as cápsulas à temperatura de 400 °C.

A Figura 29 mostra o lote 2 e os gabaritos de prensagem no forno durante o aquecimento.



**Figura 29: Fotografia do Lote 2 e Gabaritos no Forno à 400° C**

Após estarem em equilíbrio térmico, gabarito e peça Capa são levados à prensa, onde as mesmas etapas de procedimento de montagem descritas anteriormente foram efetuadas unindo-se as peças Capa, Base e Diafragma de aço inox.

A Figura 30 mostra a comparação de perda de temperatura entre os métodos, onde se vê a queda para 127,3° C em 49 segundos no primeiro método de montagem e 309° C em 51 segundos no segundo método de montagem.



Figura 30: Fotografia comparativa dos métodos de prensagem a quente.

Fonte: Autor

Após montadas as peças, estas foram preenchidas com óleo hidráulico (Shell Spirax, S1 ATF TASA, Fluido para transmissões automáticas). Este processo ocorre em uma cuba a vácuo como mostram as Figuras 31 e Figura 32, onde a cápsula fica submersa pelo óleo, preenchendo-a por completo. As peças ficaram sob o óleo em vácuo. Para garantir que todo o ar do invólucro pudesse passar pelo orifício e também pela camada de óleo sobre a cápsula, este processo se deu em 24 horas. Este procedimento foi replicado da mesma maneira nos dois lotes de amostras.



**Figura 31: Fotografia da Cuba e Cápsulas ao lado da Bomba de vácuo (ORION)**

**Fonte: Autor**

Na Figura 32, observam-se bolhas de ar saindo de dentro da cápsula.



**Figura 32: Fotografia cápsulas sendo preenchidas com óleo.**

**Fonte: Autor**

Após o preenchimento da cápsula se faz necessário vedá-las, e isto se dá através da prensagem de uma esfera de aço inox 316 de diâmetro de 2,5 milímetros, no furo posicionado na parte posterior da peça Base. Observa-se que não foram calculados os valores de interferência para esta esfera, pois anteriormente, na execução do projeto PIPE FAPESP 02/12883-0, elas suportaram a pressão de 1000 Bar.

A Figura 33 mostra o procedimento de prensagem feito no equipamento da empresa ORION.



**Figura 33: Fotografia das cápsulas vedadas por uma esfera na Prensa (ORION).**

**Fonte: Autor.**

Nesta etapa as cápsulas estão prontas para o ensaio de estanqueidade e suporte de máxima pressão, como se vê na Figura 34.



**Figura 34: Fotografia das cápsulas do lote 1 prontas.**

**Fonte: Autor.**

#### 4.4 Ensaio de Estanqueidade

As cápsulas do lote 1, foram ensaiadas com o Booster Hidropneumático da empresa ORION Ind e com de sistemas autômatos de pressão Ltda, com capacidade de aplicar até 1000 Bar de pressão hidráulica, mostrado na Figura 35.



**Figura 35: Fotografia do Booster Hidropneumático (ORION)**

**Fonte: Autor**

Foi construído um adaptador para alojar cápsula e conectá-la ao Booster.

A Figura 36 mostra o dispositivo e a cápsula em ordem de acoplamento, onde a cápsula fica alojada sobre um anel Oring e calçada pela parte posterior pelo êmbolo roscado.



**Figura 36: Fotografias do adaptador para testes no Booster Hidropneumático.**

**Fonte: Autor**

A cápsula é colocada dentro do adaptador, encostada a um anel Oring para vedação. Coloca-se um papel tipo toalha que mostrará eventuais vazamentos do óleo proveniente da cápsula. Por último fecha-se o adaptador rosqueando o êmbolo de apoio até que o conjunto deforme o anel Oring vedando totalmente o adaptador.

Seguimos com a aplicação progressiva da pressão, criando uma escala com o patamar inicial entre 90 à 120 Bar. Após isto, a escala sobe para 100 em 100 Bar até o limite de 1000 Bar.

Os testes seguiram de acordo com as etapas descritas abaixo:

- A primeira aplicação de pressão é da ordem dos 30 Bar, deixando o sistema pressurizado por 30 segundos, depois é feita a verificação para se constatar possíveis vazamentos.
- Não havendo vazamentos segue-se o ensaio.

- As demais aplicações de pressão são progressivas, 30, 60, 90 e 120 Bar deixando o sistema pressurizado por 30 segundos a cada escala e faz-se a verificação de vazamento a cada uma destas.
- Prosseguindo o ensaio, aplicam-se progressivamente 200, 300, 400, 500, 700, 800, 900 Bar, e se repetem os passos de espera e verificação de vazamentos para todas as aplicações, até o limite estipulado de 1000 Bar.

Após a análise dos resultados do primeiro lote de cápsulas, modificou-se o sistema de teste das cápsulas em virtude de se obter melhores resultados.

Visando o aprimoramento da tecnologia desenvolvida neste trabalho e evitando falhas no teste, foi construído um novo adaptador com dois anéis Orings, para testar as cápsulas.

A Figura 37 mostra o adaptador já com uma cápsula inserida.

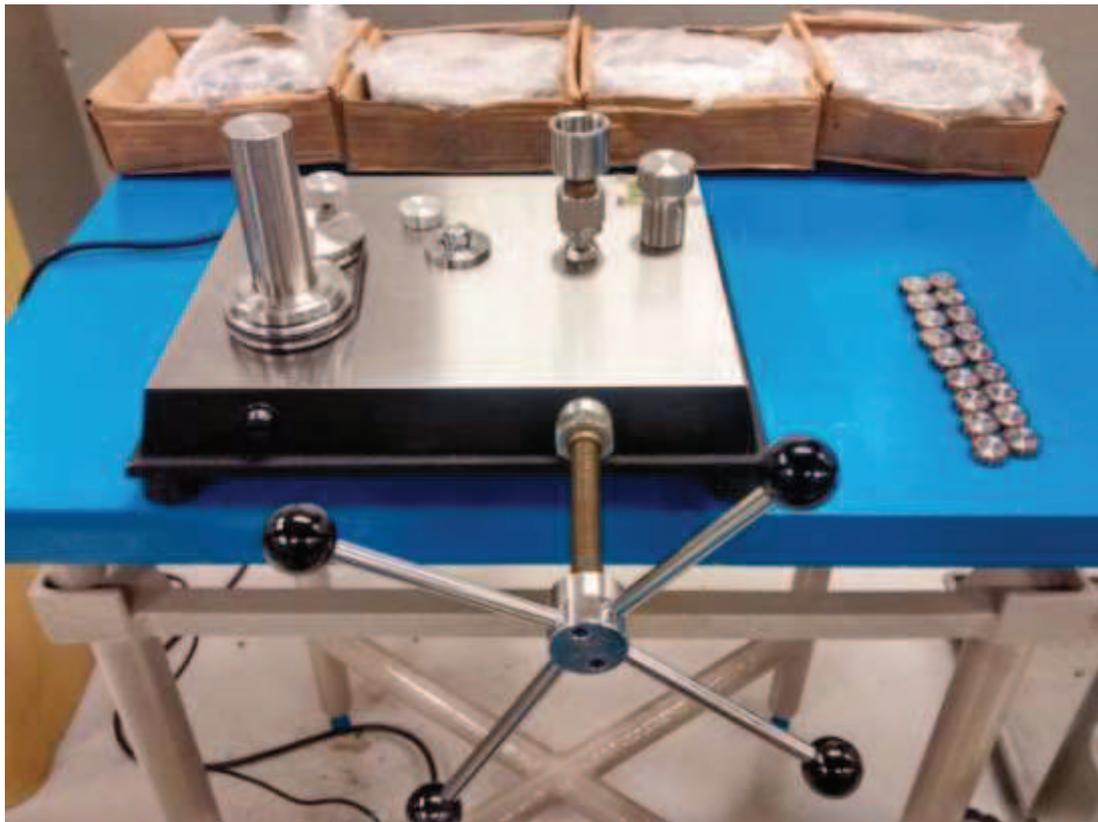


**Figura 37: Fotografia do novo adaptador para testes**

**Fonte: Autor**

Outra modificação em relação aos testes foi a substituição do Booster Hidropneumático por uma Balança de Peso Morto, por ser um equipamento mais preciso e confiável, geralmente usado em calibrações de sensores de pressão.

A Figura 38 mostra a Balança de peso morto com o adaptador já conectado, e as cápsulas do lote 2.



**Figura 38: Fotografia da Balança de Peso Morto e cápsulas do lote 2.**

**Fonte: Autor**

Devido à mudança de equipamento o método de ensaio tomou outra sequência lógica, pois a Balança de Peso Morto é calibrada através de pesos, estes ao serem erguidos pelo sistema hidráulico da Balança indicam uma determinada pressão.

O teste segue a seguinte sequência de execução: presuriza-se o sistema hidráulico até que o peso seja erguido, e logo após se faz a verificação de vazamentos, progressivamente até atingir 1000 bar. O papel toalha também foi utilizado neste ensaio de forma a visualizar mais facilmente a fonte de vazamento e identificar, se o óleo que vazou foi do sistema da balança ou da cápsula, pois são de cores distintas, vermelho para a cápsula e amarelo para a Balança.

Os defeitos de fabricação da cápsula são as principais fontes de vazamento e, geralmente, isto ocorre em baixas pressões. Pensando nisto as etapas de testes seguiram a seguinte escala:

- Pressuriza-se de 10 bar em 10 Bar até 100 Bar.
- De 100 Bar passa para 150 Bar.
- De 150 Bar para 210 Bar.
- De 210 para 310,410, e progressivamente de 100 em 100 Bar até 910Bar.
- De 910 para 1000 Bar. Nesta pressão aguarda-se por volta de 5 minutos para se fazer a verificação.

A cada verificação de vazamentos utilizou-se o mesmo papel caso este estivesse intacto, do contrário era substituído.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os passos da metodologia descrita para o primeiro lote, os testes iniciaram com a cápsula N°1, que ao receber 30 Bar de pressão, vazou pelo diâmetro de ajuste por interferência. Dando continuidade ao ensaio, testou-se a cápsula N°2, que também apresentou vazamento pela mesma região.

A cápsula N°3 resistiu até 220 Bar quando a esfera se despreendeu do seu alojamento, vazando o óleo do invólucro e estourando a membrana de aço inox.

A Figura 39 mostra a cápsula após o teste, com a membrana de aço inox rompida.



**Figura 39: Fotografia da cápsula N°3.**

**Fonte: Autor.**

Tal fato se deu por conta da esfera não ter apoio, e a pressão do óleo ser maior que a tensão de interferência entre a esfera e o furo do alojamento.

Na Figura 40 nota-se que existe um furo no centro na peça roscada, que foi feito em função do tipo do processo de usinagem.



**Figura 40: Fotografia do adaptador com furo de centro.**

**Fonte: Autor.**

Uma solução prática, para evitar que a esfera fosse removida de seu alojamento no momento do ensaio, foi o uso de uma chapa metálica como apoio. Esta Chapa tem o diâmetro semelhante ao do encosto do adaptador.

O ensaio da cápsula N°4 apresentou o mesmo vazamento das cápsulas 1 e 2, e da mesma forma a N° 5.

Em contra partida, a cápsula N°6 suportou os testes até 520 Bar, fazendo necessário a troca do anel Oring, que saiu de seu alojamento e foi deslocado entre a cápsula e o adaptador, causando a interrupção do ensaio. Outro anel Oring de maior dimensão foi colocado em seu

lugar, e assim o ensaio continuou e gradativamente a pressão atingiu 700 Bar. Nesta escala foi notado o vazamento de óleo entre a esfera e seu alojamento.

A Figura 41 mostra o vazamento, no centro da cápsula.



**Figura 41: Fotografia do adaptador com a cápsula N°6.**

**Fonte: Autor**

Não foi possível continuar os ensaios devido ao anel Oring apresentar o mesmo comportamento do anel anteriormente substituído. Para retirar a cápsula N°6 foi necessário cortar o adaptador, impossibilitando a continuidade dos ensaios das outras cápsulas.

A Figura 42 mostra os dois casos onde o Oring foi deslocado entre a cápsula e o alojamento.



**Figura 42: Fotografia do adaptador com anel Oring fora do alojamento.**

**Fonte: Autor**

Em contra partida aos testes realizados nas cápsulas do lote 1, o aprimoramento da montagem das cápsulas aliado ao novo adaptador contribuíram de forma positiva no resultado dos testes das cápsulas do lote 2. Foram testadas todas as cápsulas que não apresentaram defeitos. As cápsulas nº 2,6,7,8 e 14 passaram pelo processo de remanufatura, efetuado-se a soldagem da esfera de vedação, devido a vazamento constatados antes dos testes.

Foram descartadas dos testes as cápsulas, nº 2 por vazamento no furo da esfera mesmo após a remanufatura, nº 6 idem ao anterior, nº 11 por ter seu diafragma perfurado no momento da montagem.

Seguindo o protocolo de teste igualmente para todas as amostras, os resultados obtidos seguiram o mesmo padrão e todas as amostras atingiram a pressão máxima de 1000 Bar, que também é o limite da Balança de Peso Morto.

O teste seguiu com as amostras restantes do lote 1 que não tinham sido ensaiadas devido à falha do adaptador. Das amostras restantes, de número 7 à 12, somente as nº11 e 12

suportaram os 1000 Bar. A cápsula n° 9 teve êxito ao atingir a máxima pressão, porém, um vazamento ínfimo mostrado no papel toalha fez com que esta fosse reprovada. Do restante todas vazaram no diâmetro do ajuste, mostrando o defeito gerado na montagem do primeiro lote.

A Tabela 9 mostra o resultado dos ensaios de estanqueidade, evidenciando as cápsulas aprovadas e reprovadas, sendo que as aprovadas são as cápsulas que atingiram 1000 Bar, e reprovadas as que tiveram vazamento na interface de contato.

Tabela 9: Resultados dos testes de estanqueidade.

Lote 1		
Amostra	Pressão	Resultado
1	30 Bar	Reprovado
2	30 Bar	Reprovado
3	220 Bar	Reprovado
4	30 Bar	Reprovado
5	30 Bar	Reprovado
6	720 Bar	Reprovado
7	10 Bar	Reprovado
8	10 Bar	Reprovado
9	1000 Bar	Aprovado
10	10 Bar	Reprovado
11	1000 Bar	Aprovado
12	1000 Bar	Aprovado
Lote2		
1	1000 Bar	Aprovado
2	Defeito	Reprovado

3	1000 Bar	Aprovado
4	1000 Bar	Aprovado
5	1000 Bar	Aprovado
6	Defeito	Reprovado
7	1000 Bar	Aprovado
8	1000 Bar	Aprovado
9	1000 Bar	Aprovado
10	1000 Bar	Aprovado
11	Defeito	Reprovado
12	1000 Bar	Aprovado
13	1000 Bar	Aprovado
14	1000 Bar	Aprovado
15	1000 Bar	Aprovado
16	1000 Bar	Aprovado
17	1000 Bar	Aprovado
18	1000 Bar	Aprovado

Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÃO

A otimização do processo de encapsulamento para sensores de pressão isolados do meio, com uma nova tecnologia de montagem, se mostra adequada para atender às necessidades de trabalho desses componentes. Os valores de interferência e pressão de contato calculados, foram suficientes para suportar os esforços almejados, no qual este novo modelo foi submetido. Os parâmetros de usinagem dos diâmetros do ajuste com interferência mecânica, atenderam aos requisitos efetuando aderência suficiente para manter a cápsula hermeticamente lacrada. Em relação à montagem com os novos parâmetros e dispositivos, foi possível uma melhora significativa dos resultados. Das 18 cápsulas do lote 2, 15 alcançaram o objetivo de resistir à 1000 Bar. As peças defeituosas não puderam ser testadas devido às irregularidades causadas por outros fatores de vedação, não estudados neste trabalho. Com o novo método foi alcançada uma confiabilidade de fabricação de 83,33%, e para o funcionamento 100% das amostras.

## **TRABALHOS FUTUROS**

Visto que este trabalho tende a gerar um produto industrializado, fica claro que é necessário a sua continuidade, e estudos do comportamento e processos de outras partes deste encapsulamento, que são: a vedação entre o furo e a esfera que apresentou problemas de vazamentos, os isolantes dos terminais elétricos que não foram estudados neste trabalho e o estudo do levantamento de custos para a fabricação deste novo modelo de cápsula e do mercado de atuação nacional e ou internacional desse dispositivo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6158; Sistemas de tolerância e Ajustes, junho de 1995, 79 páginas.
- ABNT NBR ISO 6892; Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente; 34 páginas
- Agostinho, Oswaldo Luiz. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, 9º edição, editora Bluncher 2007.
- Bulba, Edivaldo Antonio. Tolerâncias Medições e Qualidade, 1ª edição, edição do autor, ISBN: 978-85-909284-0-9
- CHAVEZ, F. P. CHARRY, E. R. “A Microeletrônica e os Sensores” Artigo convidado no XXXVI Congresso de Química/ I workshop sobre Sensores Químicos e Biosensores São Paulo, Brasil Setembro 1996.
- FURLAN, H. FURLAN, H. Desenvolvimento de Membranas para Sensores de Pressão utilizando freamento eletroquímico, Escola Politécnica da USP 2003; Tese Doutorado, 79 páginas.
- F. Della Lucia, P. Zambrozi Jr, F. Frazattoa, M. Piazzettaa, A. Gobbia, Design, fabrication and characterization of SAW pressure sensors for offshore oil and gas exploration, Brazil State University of Campinas, School of Electrical and Computing Engineering, Av. Albert Einstein, 400, 13083-852 Campinas, SP, Brazil (2014)
- G. M. YANG <sup>A</sup>, J. C. COQUILLE <sup>B</sup>, J. F. FONTAINE <sup>C</sup>, M. LAMBERTIN <sup>D</sup>; Influence of roughness on characteristics of tight interference fit of shaft and a hub; France august 1999
- H. Boutoutaou, M. Bouaziz, J.F. Fontaine, Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account, France, 2011.
- Irappa Sogalada<sup>a</sup>, H.N. Ashokaa<sup>a</sup>, N.G. Subramanya Udupab<sup>b</sup>, Influence of cylindricity and surface modification on load bearing ability of interference fitted assemblies; Bangalore, India; 26 June 2012 pg 629– 640.
- Irappa Sogalad, e Subramanya Udupa, Influence of cryogenic treatment on load bearing ability of interference fitted assemblies, Davangere-577 004, India, 2010.
- Lung-Tai Chen, Jin-Sheng Chang, Chung-Yi Hsu, and Wood-Hi Cheng, Fabrication and Performance of MEMS-Based Pressure Sensor Packages Using Patterned Ultra-Thick Photoresists, ISSN 1424-8220, 2009
- K.Birkelund, (2001), Peter Gravesen, sergey Shiryaev, Per Brandt, Maria Dall Rasmussen, High-pressure silicon sensor with low-cost packaging, Denmark, 2001
- Norton, Robert L. Projetos de Máquinas, 2ª edição, editora Bookmam, 2004

PENALVER. C. A. DIEGO; FRAGRA. A. MARIANA; FURLAN. HUMBER; Development of a low-cost packaging for MEMS Pressure Sensor; Conference: IBERSENSOR 2014 - IEEE Conference Publications, At Bogota.

PENALVER. C. A. DIEGO; FRAGRA. A. MARIANA; FURLAN. HUMBER; Research and Development of Packaging for Pressure Microsensors: A partnership between academia and industry; XIII Brazilian MRS meeting; 09/2014

PENALVER. C. A. DIEGO; FURLAN. HUMBER; Inovação do Processo de Encapsulamento de Sensores Isolados do Meio; IX WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO PAULA SOUZA; São Paulo, 15 e 16 de outubro de 2014

R. Lewis, M.B. Marshall, R.S. Dwyer-Joyce, Ultrasonic Characterisation of an Interference Fit, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, UK, 2003

SEIDEL, H.; CSEPREGI, L.; HEUBERGER, A.; BAUMGÄTEL, H. Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions. I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers. Journal of the Electrochemical Society, v.137, N.11, p. 3612-26, november 1990

## **ANEXOS**

## Anexo1

Tabela 10 Equipamentos e suas localizações

Equipamento	Resolução	Identificação / modelo	Localização
Paquímetro Universal, (150mm)	0,01 mm	Digimess / IP 67	FATEC-SP  Laboratório de Usinagem
Micrômetro externo 0-25 mm	0,005mm	Digimess	FATEC-SP  Laboratório de Usinagem
Torno Universal	0,05	Nardini  Nodus 220 Gold	FATEC-SP  Laboratório de Usinagem
Micrômetro Interno 15-20 mm	0,002mm	Tessa	FATEC-SP  Laboratório de Metrologia
Máquina Universal de Ensaios	100 KN	Emic  Linha DL	FATEC-SP  Laboratório de Materiais
Forno	1300° C	Jung 1-2313	FATEC-SP  Laboratório de Materiais

Prensa Hidráulica	120 KN	Shimadzu	Laboratório de Materiais
Espectrômetro de Massa		Spectro MAXx-LMF05	FATEC-SP Laboratório de Metrologia
Torno CNC	0,005mm	Hardinge GS150	FATEC-SP Laboratório de CNC
Software Solid Edge		ST6	FATEC-SP Laboratório de CNC
Booster Hidropneumático	1000 Bar	Magral	ORION
Cuba à Vácuo	0,7 Atm	Dosivac	ORION
Prensa Hidráulica	3000 psi	Marcon	ORION
Balança de Peso Morto	1000 Bar	ABSI	ORION

Fonte: Autor

Anexo 2

Certificado do Aço AISI 316



**CERTIFICADO DE QUALIDADE**

Pág.: 1 de 1  
Número: A2015091400292

ELIMOX CENTRAL DE AÇO INOXIDÁVEL  
Av. Paulista, 2550  
Jardim - São Paulo - SP - CEP: 04320-001  
Tel: (11) 2095-1400 Fax: (11) 2095-1444  
E-mail: vendas.sp@elimox.com.br  
Site: http://elimox.com.br

CLIENTE: FUNDACAO DE CIENCIA APLICACOES E TECNOLOGIAS ESPECIAIS  
PEDIDO: 292079  
NF: 218318  
DATA: 18/09/2015

Nº	Código	Produto	Corrida	Quantidade	Uni.
1	996	BARRA RED A276 316L 2"	IS8229	99.000	KG
2	2050	BARRA RED A276 316L 1.1/2"	F-214	55.000	KG

Item	Composição Química									
	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	S	Si		
1	0.019	16.670	1.360	2.100	10.010	0.037	0.024	0.330		
2	0.020	16.690	1.530	2.010	10.030	0.040	0.017	0.390		

Teste de Tensão									
Item	L.R.Mpa	L.E.Mpa	Along.	Temp. °C	Red Area	Tolerancia	Acabamento	Trat.Term.	Hbw
	n/mm²	n/mm²	%	°C	%	h			
1	595.000	290.000	51.000	1.060.000	68.000	H9	A FRIQ	SO	159.000
2	569.000	280.000	51.020	1.050.000	72.000		A FRIQ	SO	163.000

Legenda	
L.R.Mpa	Limite De Resistencia Mpa
L.E.Mpa	Limite De Escoamento Mpa
Along.	Alongamento
Temp. °C	Temperatura
Red.Area	Redução De Area
Tolerancia	Tolerancia
Acabamento	Acabamento
Trat.Term.	Tratamento Térmico
Hbw	Dureza Hbw

As informações foram geradas a partir dos dados passados pelo fabricante. O certificado original encontra-se na empresa.

Conferido Eletronicamente - Dispensa a Assinatura.

Fonte: Autor

Anexo 3

Ensaio de Espectrometria de massa



**128034**

29/09/2015 15:04:27

Método: Fe-30-F  
 Comment: Aço Inox  
 Id da Amostra: Analista: Liga: Concentrações

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0704	0.452	1.59	0.0181	< 0.00050	18.03	1.99	9.94
2	0.0683	0.445	1.56	0.0172	< 0.00050	17.98	1.94	9.84
3	0.0648	0.446	1.56	0.0183	< 0.00050	18.02	1.94	9.82
4	0.0609	0.445	1.56	0.0177	< 0.00050	17.94	1.93	9.81
5	0.0634	0.445	1.57	0.0198	< 0.00050	18.13	1.95	9.90

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	< 0.0010	0.181	0.390	0.0077	0.0050	0.0580	0.0298	0.0086
2	< 0.0010	0.180	0.386	0.0079	0.0049	0.0572	0.0303	0.0055
3	0.0014	0.180	0.384	0.0068	0.0054	0.0571	0.0337	0.0071
4	0.0015	0.180	0.385	0.0070	0.0048	0.0567	0.0327	0.0057
5	< 0.0010	0.180	0.391	0.0083	0.0050	0.0578	0.0294	0.0074

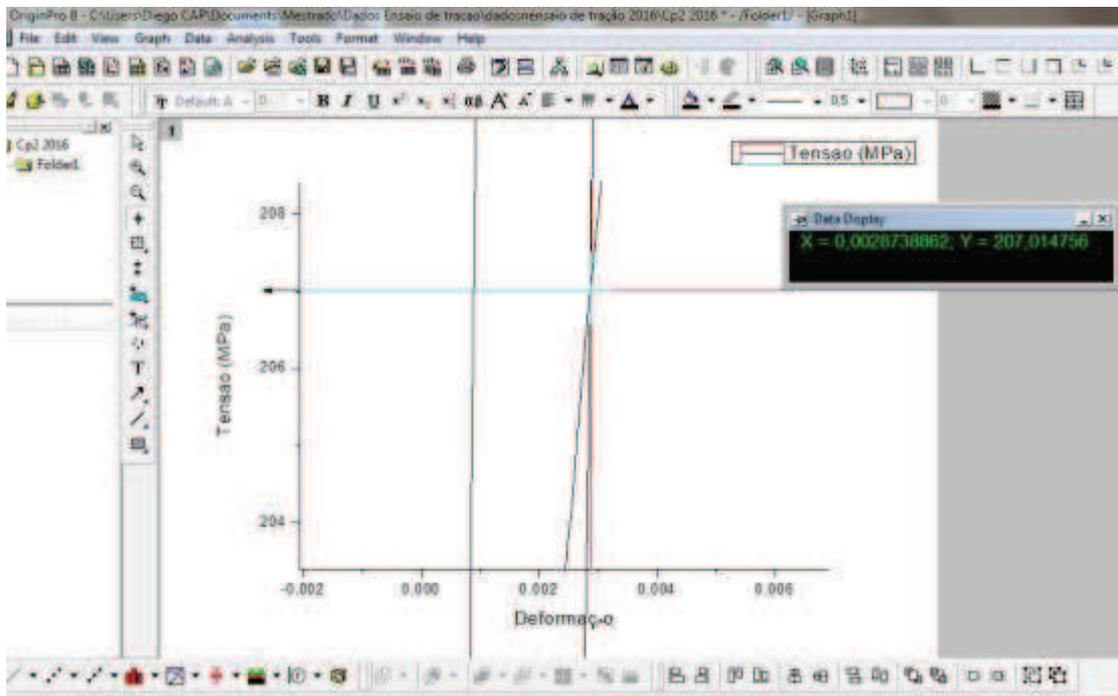
	Sn	As	Ca	B	Fe
	%	%	%	%	%
1	0.0082	< 0.0015	0.0015	< 0.00020	67.2
2	0.0079	< 0.0015	0.0018	< 0.00020	67.5
3	0.0077	< 0.0015	0.0019	< 0.00020	67.4
4	0.0076	< 0.0015	0.0018	< 0.00020	67.6
5	0.0087	< 0.0015	0.0015	< 0.00020	67.2

Fonte: Autor



## Anexo 5

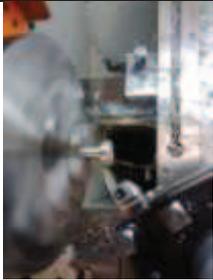
Gráfico Tensão/Deformação, indicando Limite de Escoamento do aço AISI 316.



Fonte: Autor

## Anexo 6

Tabela 11: Descrição Ilustrativa do Processo de usinagem das peças Capa e Base.

Processo de Usinagem peça Capa	Imagem ilustrativa
Faceamento	
Tornear diâmetro de 24 mm	
Fazer chanfro de 30°	
Furar no centro	
Furar com diâmetro de 15 mm	

Tornear Interno de 19 H7	
Contar	
Processo de Usinagem peça Base	Imagem ilustrativa
Facear	
Tornear 19 z7	
Furar com 6 mm	

Fazer chanfro de 5° na face	
Contar	

Fonte : Autor