

Thaís Santos Faggion

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE ENSAIOS
PARA CARACTERIZAÇÃO DE BIELAS SINTERIZADAS
APLICADAS A COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edison da Rosa

Florianópolis,
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Faggion, Thaís Santos

Desenvolvimento de metodologia de ensaios para caracterização de
bielas sinterizadas aplicadas a compressores herméticos. /T. S Faggion.
Florianópolis, 2013. 98p

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Palavras chave: propriedades mecânicas, sinterizados, biela, ensaio
de tração, *small specimens*.

Thaís Santos Faggion

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE ENSAIOS
PARA CARACTERIZAÇÃO DE BIELAS SINTERIZADAS
APLICADAS A COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre em Engenharia”, e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 01 de Abril de 2013.

Prof. Júlio César Passos, Dr. Ing.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Edison da Rosa, Dr.Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Amedeo Nannetti Bernardini, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho àqueles que são meu porto seguro exemplo e referência na minha vida e eternos amores, meus pais e irmã, Vail, Simone e Vanessa. E ao meu companheiro, amigo e motivador do meu trabalho, meu marido e melhor amigo, Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Mesmo que soe como um jargão, mas agradeço primeiramente a Deus e a minha família, que sempre foram alicerces fortes e estáveis em todos os meus segundos de vida garantindo equilíbrio, estabilidade, coragem e força em todos os momentos de forma a nunca fraquejar perante as dificuldades e aos obstáculos momentâneos e sempre passageiros.

Ao meu marido, pela persistência dia-a-dia de que eu podia terminar este trabalho e a compreensão durante as noites em claro e os finais de semana em casa estudando.

Aos meus professores da UFU, que me dedicaram tempo e atenção durante a minha graduação, em especial a três deles: ao professor Rafael Ariza, que mesmo longe sempre acreditou no meu potencial e na minha capacidade de concluir meu mestrado; à professora Sonia Goulart que sempre foi um exemplo e modelo da qual tenho enorme admiração e ao professor José Daniel Biasoli por ter me dado a chance de conhecer um pouco mais sobre materiais com uma oportunidade de iniciação científica. Por mais que estes nunca tenham chance de saber da minha gratidão e do quão importante foram, fica aqui registrado o meu agradecimento.

Ao meu orientador, professor Edison da Rosa, que mesmo com a minha ausência física da universidade, sempre se dispôs a me auxiliar e atender com portas abertas.

Ao Raul Bosco, quem confiou no meu potencial durante o período de um ano de estágio dentro da Embraco e posteriormente me oferecendo a proposta de mestrado em parceria com a empresa.

À Embraco, por ter me apoiado no projeto com fornecimento de material além de ter aberto suas portas disponibilizando seu laboratório de materiais. Em especial, aos que trabalham neste laboratório (não citarei nomes para não correr o risco de esquecer alguém) e os estagiários que ali estiveram em no primeiro semestre de 2009.

À UFSC por ter me recebido tão bem e me dado a chance de conhecer uma nova realidade, amigos incríveis, além de levar seu nome comigo.

Gostaria de citar mais nomes e poderia escrever 90 páginas de agradecimentos, mas sei que todos aos quais cabem sabem que esta linha dedico a vocês e que de todos que cruzaram meu caminho um dia eu levo algo. Aqui fica o meu MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Este trabalho visa o desenvolvimento e a sistematização de metodologia para a caracterização de componentes sinterizados submetidos a esforços de tração levando em consideração a distribuição heterogênea de poros residuais presentes nestes materiais decorrentes do seu processo de fabricação a partir de pós.

Os métodos consolidados para determinação das propriedades mecânicas usam corpos de prova (CP) padrão que não relevam a distribuição de porosidade ao longo da peça. A caracterização obtida a partir destes corpos, quando carregadas em softwares comerciais de simulação numérica, geram uma não representatividade dos resultados quando comparados ao comportamento do mesmo componente em campo.

Os componentes aqui estudados são bielas sinterizadas de compressores herméticos usados em refrigeração. A dissertação é fundamentada na análise comparativa de resultados numéricos e experimentais. Sucintamente, estudou-se duas possíveis maneiras de análise experimental as quais fornecem dados de entrada para o software comercial ANSYS. Posteriormente, os resultados gerados pelo simulador seriam confrontados com ensaios de tração feitos com a biela física e as respostas obtidas usadas para a factibilidade e validação das metodologias aplicadas.

A duas linhas de desenvolvimento experimental analisadas foram: caracterização ótica da distribuição de poros através da análise metalográfica dos planos do corpo da biela (região retangular central) com auxílio de um microscópio ótico ZEISS conectado a um software comercial de contagem dos poros e determinação de fases do materiais, e seccionamento da biela em 16 CPs cuja área do plano de tração tem valor igual a $1,22\text{mm}^2$ (menor área igual que se conseguia obter). Desta maneira, com áreas tão reduzidas, minimiza-se a variação de densidade fazendo com que os corpos ensaiados tenham maior proximidade a materiais homogêneos.

No caso da análise ótica, o dado de entrada diferencial usado no Ansys são as densidades locais. E na situação da análise experimental, os dados de entrada são as propriedades mecânicas de cada uma das 16 zonas.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, sinterizados, biela, ensaio de tração, *small specimens*.

ABSTRACT

This work aims the development and the methodology systematization to characterize sintered components submitted to tractive's effort taking into account their heterogeneous distribution of residual pores presents on its materials due to the powder manufacture process.

The currently known methods used to determining the mechanical properties usually use standard specimens that do not consider the porosity distribution throughout the part. The characterization obtained from these specimens, when inputted into a commercial simulation software, generate a non-representative result when compared with the behavior of the same component in a working field.

The components here studied are sintered connecting rods of hermetic compressors used on refrigeration. The dissertation is based on a comparative analysis of numerical and experimental results. Succinctly, it was studied two possible ways of experimental analysis providing inputs to the commercial software Ansys. Subsequently, the results generated by the simulator would be compared with tensile test made with the physical connecting rod and the responses obtained were used for feasibility and validation of the applied methodologies.

The two lines of experimental development analyzed were: optical characterization of pores distribution by metallographic analysis of the body plans of the rod with the assistance of an optic microscope ZEISS connected to a commercial software of pores counting and the determination of materials phases, and sectioning of the connecting rod into 16 test body whose area of the plan of traction has the value of 1.22mm^2 . (The smallest equals areas able to be obtained). Thus, with such small areas, the variation of density is minimized by making the specimens tested closer to an homogeneous material.

In the case of optical analysis, the differentials inputs used on the Ansys are the local densities. And in the case of experimental analysis, the inputs data are the mechanical properties of each one of the 16 areas.

Keywords: Mechanical properties, sintered, connecting rod, tensile test, small specimens.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES:

Figura 1- Imagem ilustrativa de componentes sinterizados. (www.mahle.com.br)	2
Figura 2 - Conjunto pistão – biela cuja biela não atendeu às suas solicitações de operação.....	3
Figura 3 – Modelo do corpo de prova utilizado pelo candidato a Dr. Sebastian sem informações específicas de dimensões	7
Figura 4 – Modelo do corpo de prova utilizado nos experimentos descritos nesta dissertação (maiores informações dimensionais na Figura35).....	7
Figura 5 - Representação do método de análise pontual para avaliação quantitativa de poros superficiais.....	14
Figura 6 - Representação do método de análise linear para avaliação quantitativa de poros superficiais.....	14
Figura 7 - Imagem microscópica da análise microgeométrica da alma da biela para determinação da porosidade da mesma	15
Figura 8 – Strain-gage (fonte: Dissertação Rubia Teixeira).....	16
Figura 9 – Representação da ponte de Wheatstone (Fonte: Apostila de extensometria, Edison da Rosa (2004)).....	17
Figura 10 - Fotos e desenho esquemático respectivamente do clip-gage usado nos ensaios.....	19
Figura 11 – Configuração dos extensômetros no clip-gage usado nos ensaios.....	20
Figura 12 - Força superficial Δf sobre uma área ΔA	21
Figura 13 - Componentes de tensão (Fonte: Malvern pag. 72)	22
Figura 14 - (a) Deformação uniaxial na direção x, (b) Deformação uniaxial na direção y, (c) Torção pura sem rotação. (Fonte: (Malvern, 1969)).....	22
Figura 15 - Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração (Fonte: Holt apud Domeneghetti)	23
Figura 16 - Principais informações obtidas a partir de um diagrama tensão-deformação convencional (curva de engenharia) (FONTE: Apostila do prof. Edison da Rosa)	24
Figura 17 - Alongamento de uma barra cilíndrica de um material metálico submetido a uma carga de tração uniaxial.....	25

Figura 18 - Gráfico de dureza de um metal PM em função da densidade (FONTE: Livro Fatigue Design for PM components. Esper & Sonsino).....	27
Figura 19 - (a) estado triaxial de tensões, graficamente representado pelas tensões principais; (b) tensão equivalente.	29
Figura 20 - Desenho esquemático do sentido de compactação do pó no processo de fabricação da biela sinterizada.	33
Figura 21 - Cortes nos planos A (X-Z) e B (Y-Z) feitos na peça para avaliação da distribuição de poros ao longo da alma da biela.	34
Figura 22 - Corte feito no plano X-Y para avaliação da distribuição de poros ao longo da alma da biela.	34
Figura 23 – Desenho esquemático do processo de embutimento utilizando resina acrílica.	35
Figura 24 – Desenho esquemático do processo de lixamento.....	36
Figura 25 - Principais fases e área percentual das mesmas encontradas na área referente à Figura 7 (FONTE: testes realizados pela mestranda no laboratório de materiais da Embraco).....	37
Figura 26 – Montagem do conjunto biela-pistão-cilindro.....	38
Figura 27 – Resultados obtidos através do software IMAGO® da análise microgeométrica da porosidade da alma de uma das bielas e seus respectivos posicionamentos na biela. As medições foram feitas até a metade da espessura da alma pois se acreditava que a porosidade seria simétrica.....	39
Figura 28 – Resultados da análise de 13 superfícies, obtidos através do software IMAGO® da análise microgeométrica da porosidade da alma de uma das bielas e seus respectivos posicionamentos na biela.	39
Figura 29 – Nomenclatura das partes do corpo de prova padrão.....	41
Figura 30 - Foto da biela original comparada ao tamanho de uma caneta.	42
Figura 31 - Desenho da biela e dos 16 cps extraídos da mesma.	43
Figura 32 – Imagem do suporte do CP e da montagem suporte + CP (escala da montagem: 1,5:1).....	44
Figura 33 - (a) e (b): Fotos das pastilhas metálicas e posição em relação ao suporte do CP respectivamente.	45

Figura 34 – c) e (d): Montagem do suporte + pastilhas + corpo de prova.	45
Figura 35 - Imagem do strain-gage fixado ao corpo de prova e o comparativo de tamanho com uma caneta.	46
Figura 36 - Especificação técnica do clip-gage fixado no corpo de prova.	46
Figura 37 – Foto da montagem do corpo de prova + clip-gage.....	47
Figura 38 – Imagem do equipamento EMIC e da célula usada para os testes.....	47
Figura 39– Um dos clip-gages testados inicialmente e que falhou pois suas hastes paralelas eram flexíveis e as deformações não se concentravam unicamente não região dos strain-gages (material: aço mola).....	48
Figura 40 – Clip-gage final usado nos ensaios de tração	48
Figura 41 – Foto da montagem corpo de prova + clip-gage na EMIC e uma representação esquemática da montagem. (1)Clip-gage, (2) corpo de prova + suporte, (3) parafusos de fixação do CP na EMIC, (4) cilindro oco que suporta o CP durante o ensaio (componente da EMIC).....	49
Figura 42 – Imagem ilustrativa do sistema Spider8-30 600Hz utilizado	49
Figura 43 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados para a análise experimental.....	50
Figura 44 - Vista frontal dos cps e suas respectivas posições na biela.	53
Figura 45 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 11...	53
Figura 46 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 12...	54
Figura 47 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 13...	54
Figura 48 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 14...	55
Figura 49 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 21...	55
Figura 50 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 22...	56
Figura 51 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 23..	56
Figura 52 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 24...	57
Figura 53 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 31.	57

Figura 54 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 32.	58
Figura 55 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 33.	58
Figura 56 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 34	59
Figura 57 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 41.	59
Figura 58 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 42.	60
Figura 59 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 43.	60
Figura 60 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos cps posição 44.	61
Figura 61, 62 e 63 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 1 das bielas A, B e C respectivamente.....	62
Figura 64 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 1... 63	
Figura 65, 66 e 67 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 2 das bielas A, B e C respectivamente.....	64
Figura 68 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A,B e C linha 2.... 65	
Figura 69, 70 e 71 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 3 das bielas A, B e C respectivamente.....	66
Figura 72 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 3... 67	
Figura 73, 74 e 75 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 3 das bielas A, B e C respectivamente.....	68
Figura 76 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 4... 69	
Figura 77 - Sentido de compactação e distribuição da dureza ao longo da alma em função do atrito dos grãos com as paredes do molde.	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Relação mecanismo de falha com modos de falha	29
Tabela 2 - Relação característica do material com critério de falha.....	29
Tabela 3 – Relação modo, mecanismo e critério de falha (Fonte: dados de aula de fratura e fadiga, Edison da Rosa, 2009).....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ASTM* - *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
- CAD* - *Computer Aided Drafting* (Projeto auxiliado por computador)
- CERTI – Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
- CP – corpo de prova
- DM – *DesignModeler* (Modelador de projeto)
- FEESC - Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina
- GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico
- LVDT - *Linear Variable Differential Transducer* (Transdutor Diferencial de Variável Linear)
- MPIF - *Metal Powder Industries Federation* (Federação das Indústrias de Metal em Pó)
- PM – *Powder Materials* (materiais obtidos a partir de pós)
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- UFU – Universidade Federal de Uberlândia
- VIAM -*All-Union Institute of Aviation Materials* (Toda União Instituto de Materiais de Aviação)

SUMÁRIO	
INTRODUÇÃO.....	1
1. OBJETIVOS	3
2. CONTRIBUIÇÃO e MOTIVAÇÃO.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 MATERIAIS SINTERIZADOS POROSOS	9
3.1.1 Introdução ao processo.....	9
3.1.2 Influência da porosidade nas propriedades mecânicas	11
3.1.3 Determinação do percentual volumétrico de poros	12
3.1.4 Análise quantitativa de poros e micro constituintes	13
3.2 TRANSDUTORES ELÉTRICOS - CLIP GAGE	15
3.3 TENSÃO E DEFORMAÇÃO (fundamentos).....	21
3.3.1 Tensão	21
3.3.2 Deformação	22
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO	23
3.4.1 Propriedades mecânicas.....	24
3.5 MODOS E CRITÉRIOS DE FALHA	28
4. METODOLOGIA	33
4.1 PRIMEIRA METODOLOGIA.....	33
4.1.1 Análise ótica da porosidade.....	33
4.1.2 Análise numérica	37
4.1.3 Análise experimental	38
4.1.4 Confronto de resultados.....	38
4.2 SEGUNDA METODOLOGIA (NOVO MÉTODO EXPERIMENTAL).....	40
4.2.1 Análise experimental	42
4.2.2 Análise numérica	50
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	53
6. CONCLUSÕES.....	71
7. CONTINUIDADE DO TRABALHO	73
ANEXO A	79
ANEXO B.....	87
APÊNDICE A.....	89
APÊNDICE B.....	91

INTRODUÇÃO

A busca por materiais com melhores características mecânicas para o seu segmento tem aflorado no mercado a busca por materiais com propriedades bastante peculiares, como é o caso dos materiais compósitos sinterizados.

No passado, apenas algumas tentativas de correlacionar as propriedades mecânicas às características estruturais da porosidade de um material sinterizado foram publicadas. (Beiss, et al., 2001)

A metalurgia de pós ferrosos percorreu um vasto caminho desde seu início, em 1937, quando a General Motors iniciou a sua produção de bombas de óleo sinterizadas. O processo de metalurgia do pó, “powder metallurgy”, é ideal para a produção em massa de componentes estruturais de forma complexa e com tolerâncias apertadas, sem perda significativa de material. Estas características tornam o processo não só econômico, mas também ajuda na redução do consumo energético e de material, diminuindo efeitos nocivos sobre o ambiente. (Esper & Sonsino, 1994)

Em 1965, nos EUA, surgiu a necessidade premente para a produção de filtros de aviação com uma capacidade de filtração de 5 μ m, associado com a necessidade de aumentar a vida útil dos motores das aeronaves. Para resolver este problema, o *Gorky Polytechnic Institute* trabalhou com a *All-Union Institute of Aviation Materials (VIAM)* para desenvolver a tecnologia para fabricação de um material sinterizado a partir de pó de aço inoxidável. (Shmelev, 2002).

Desde então, aços sinterizados são utilizados com sucesso em todo o mundo em larga escala, mesmo em componentes estruturais sob grandes solicitações mecânicas (Esper, et al., 1974 apud Sonsino, 1994) contanto que as características especiais de aços PM sejam levadas em consideração na fase de concepção.

Peças sinterizadas ferrosas (ferro puro, aços e outras ligas ferrosas) são componentes integrantes da classe de materiais sinterizados produzida em maior quantidade, alcançando 740.000 toneladas/ano (2003). Tais peças, em geral, são pequenas (peso médio de 100 gramas) e a sua produção é de 7,4 x 10⁹ peças/ano. (Klein, 2004).

Esses componentes encontram uso em praticamente todas as áreas de engenharia. A economicidade na produção em grande série de peças iguais, a capacidade de obtenção de elevada precisão dimensional associada à alta produtividade, são fatores diferenciais na escolha de peças sinterizadas.

Materiais que pertencem a esta categoria são chamados de materiais sinterizados metálicos. Um importante obstáculo para o crescimento é o insuficiente conhecimento e falta de credibilidade do processo de sinterização entre os projetistas dentro das indústrias. Embora os dados quantitativos das propriedades do material estejam disponíveis há anos, a literatura especializada não indica uma metodologia abrangente do processo de projeto. (Esper & Sonsino 1994).

Aços sinterizados oferecem uma série de vantagens. São econômicos, pois em seu processo de fabricação poupa-se material e energia ¹. Por exemplo, um componente pode ser feito de diferentes tipos de sinterizados metálicos; desta forma, os procedimentos caros como junção de várias peças de aço diferentes pode ser evitada. As propriedades do material podem ser adaptadas aos requisitos técnicos de forma relativamente simples.

No início dos anos trinta do século XX os componentes sinterizados metálicos fabricados em ligas ferrosas e não ferrosas passaram a ser introduzidos em grande escala em diversos ramos da indústria automobilística. Não só nos EUA, mas também na Europa e Japão, fizeram com que a indústria automotiva se tornasse o maior consumidor de peças sinterizadas metálicas da atualidade, o que evidencia as grandes vantagens do processo. (Esper & Sonsino 1994). No ramo de refrigeração, a tendência do emprego de componentes sinterizados não é diferente. No caso de compressores, partes como biela e pistão, entre outros, são produzidos através da técnica de sinterização.

Em parceria com a Embraco - Whirlpool unidade compressores, o trabalho cuja proposta aqui se apresenta visa dar continuidade aos estudos decorrentes ao longo dos anos citados acima, otimizando o projeto dos componentes sinterizados através da associação das características positivas e visionárias dos materiais metálicos sinterizados às propriedades ideais de um material sob solicitação. No caso em estudo neste trabalho, o componente a ser estudado é a biela de um compressor hermético comercial utilizado em refrigeração.



Figura 1- Imagem ilustrativa de componentes sinterizados. (www.mahle.com.br)

¹ Informação fornecida pelo prof. Aloisio Klein em notas de aula. PGMAT - Sinterizados

1. OBJETIVOS

O trabalho aqui apresentado propõe, através associação da caracterização experimental do material e da simulação numérica da peça em operação, o aprimoramento do projeto e análise de componentes sinterizados aplicados em compressores herméticos (bielas, placa válvula, buchas, pistões, etc.) analisando critérios de falha, bem como a dispersão das propriedades mecânicas.

O mesmo fundamenta-se na investigação e desenvolvimento de um procedimento de referência, de natureza analítica, numérica e experimental, a fim de obter uma prévia do desempenho em operação de peças reais ou virtuais, de forma a auxiliar na otimização de projetos de componentes novos ou já existentes.

Iniciando o estudo microestrutural, a primeira parte do material aqui relatado aborda um levantamento da porosidade da biela envolvendo parâmetros como: formato, tamanho, distribuição e quantidade de poros. Ensaio estáticos (trativos) competem a tal etapa objetivando o levantamento das curvas de tensão-deformação. As informações nesta etapa coletadas servirão de dados de entrada para a simulação numérica da biela, bem como para a comparação dos resultados numéricos e experimentais da biela como um todo, em operação.

O objetivo dos resultados obtidos com o mapeamento do material pretende possibilitar a avaliação se, nos locais de fratura, além de pontos de acúmulo de tensão, há também interferência da qualidade do material.

As especificações obtidas com base em experimentos ou experiência prática satisfazem de forma mais completa as especificações da indústria de metalurgia do pó e são destinadas a melhorar a confiabilidade dos resultados dos testes de produção de acordo com um padrão de funcionamento. O resultado deste processo de especificação e testes é um produto com acompanhamento de um grau superior e é mais confiável em operação. (Bezmyannyi, et al., 2003)



Figura 2 - Conjunto pistão – biela cuja biela não atendeu às suas solicitações de operação.

2. CONTRIBUIÇÃO e MOTIVAÇÃO

O renovado interesse na aplicação dos materiais sinterizados em estruturas dimensionalmente pequenas e sob grande sollicitação tem conduzido a um amplo esforço no sentido de caracterizar o comportamento de componentes obtidos pelo processo de sinterização.

Na literatura, encontram-se disponíveis técnicas genéricas de avaliações de critérios de falha. Todavia, a cada nova combinação de elementos de liga e parâmetros de compactação, surge um novo material sinterizado, com diferentes propriedades mecânicas.

Um material novo, assim como qualquer outra técnica de produção, tem de ser avaliado e qualificado antes de ser empregado em componentes vitais ou funcionalmente importantes. Para tal efeito, as propriedades necessárias para um componente funcionar satisfatoriamente durante sua vida útil prevista devem ser aprovadas a fim de garanti-las dentro de tolerâncias aceitáveis na produção em série.

A confiança no desempenho contínuo de componentes de engenharia e estruturais depende de sua resistência à falha por fadiga. Várias incertezas estão envolvidas para garantir essa confiabilidade em fadiga. Muitas das vezes faz-se necessário testar estruturas em larga escala antes da sua utilização em serviço. Estes testes devem ocorrer em um ambiente semelhante ou que simule as condições de operação. (Smith, et al., 1970)

A redução do elevado custo dos testes em larga escala pode ser obtida abreviando-se e simplificando o programa de testes, melhorando as técnicas analíticas disponíveis para a previsão do desempenho da peça pelo engenheiro.

Atualmente, as empresas de refrigeração, especificamente de compressores, têm grande dificuldade em determinar qual o melhor critério de falha para componentes sinterizados aplicados a compressores herméticos além da divergência de resultados entre a análise numérica e os testes experimentais realizados com os componentes finais. As informações atualmente disponíveis na literatura não atendem aos requisitos de confiabilidade e miniaturização destes, especialmente tratando-se do desempenho à fadiga, fator estreitamente ligado ao arredondamento e distância dos poros. (Beiss, et al., 2001). Uma forma de tentar suprir essa lacuna existente na literatura é através da prototipagem de componentes. Em tal processo, testa-se os modelos sob carregamento de serviço a fim de se garantir a durabilidade de um componente; isto pode ser realizado sob condições reais ou por simulação da operação em laboratório.

No ano de 2000, Phillips, King e Moon publicaram um artigo sobre micromecanismos de falha do material sinterizado e definiram quanto da informação pode ser transportada a partir da nossa atual compreensão de materiais totalmente densos. Segundo eles, todas as propriedades de massa, módulos elásticos, resistência à tração, etc., são influenciadas pela presença de poros. Os detalhes de cada propriedade dependem dos valores e formas dos poros.

Sebastian Götz, aluno da Technische Universität Dresden, na Alemanha, empenhava-se em 2009 em uma tese de doutorado cujo tema e assunto são similares e abrangem o mesmo foco da presente dissertação. A diferença entre os trabalhos está no fato de, usualmente, a caracterização ser feita em corpos de prova padrão. Os corpos de provas utilizados por Sebastian foram extraídos de tarugos sinterizados, como discos de hockey, seccionados perpendicularmente ao plano de compactação. A porosidade das espécimes são significativas porém a aplicação dos dados extraídos limita-se a componentes cuja altura e pressão de compactação sejam iguais aos dos tarugos (ainda sem levar em consideração granulação e grau de compactação). Enquanto isso, no atual trabalho, os ensaios experimentais e o levantamento das curvas de propriedades foram obtidos através de CPs extraídos o componente final, no caso, a biela.

Os corpos de prova padrão podem não ser uma exata representação da peça de trabalho como todo, porque a estrutura de grãos ao longo da peça pode ser diferente (Czichos, *et al.*, 2006).

Assim sendo, os testes realizados em corpos de prova padrão não reproduzem as condições superficiais da peça como: tensões; distribuição, forma e regularidade dos poros. O sentido, altura e pressão de compactação interferem diretamente na porosidade e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do componente. (Condon, 2006).

Ainda segundo Czichos, *et al.*, (2006), em peças menores ou quando uma região do componente avaliado é a parte crítica, uma peça de trabalho pode ser sacrificada para fazer se obter as amostras.

Baseado na citação acima referenciada, sendo os corpos de prova do presente trabalho o componente final, objetiva-se a diminuição desses erros cumulativos, conseqüentemente alcançando uma maior proximidade dos valores reais de tensão e deformação.

Além disso, a caracterização obtida, por exemplo, de uma biela sinterizada, não é restrita a tal componente. Outras peças cujo processo de fabricação, porosidade e solitação sejam similares, poderão ter

desempenho de operação previsto pelo método de ensaio nesta dissertação proposto.

O laboratório alemão onde o doutorando Sebastian pesquisa, *Institut für Festkörpermechanik*, através de seu docente professor *Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Hardtke* propôs em 2009 um intercâmbio de alunos com a finalidade de ambas as instituições enriquecerem seus conhecimentos em termos experimentais. O convite, vindo de uma universidade internacional de renome e a abordagem do tema por um aluno de doutorado serviram como impulso final e garantia de interesse científico sobre o assunto e tema escolhido para a dissertação do trabalho aqui relatada.

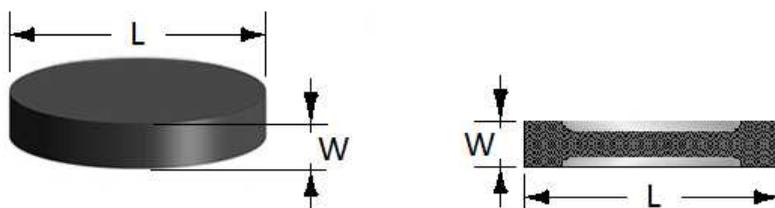
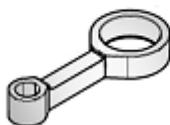


Figura 3 – Modelo do corpo de prova utilizado pelo candidato a Dr. Sebastian sem informações específicas de dimensões

Olhal maior



Alma



Olhal menor

Figura 4 – Modelo do corpo de prova utilizado nos experimentos descritos nesta dissertação (maiores informações dimensionais na Figura35).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS SINTERIZADOS POROSOS

3.1.1 Introdução ao processo

Ao longo dos anos a metalurgia do pó tem se firmado como uma excelente alternativa aos processos convencionais de produção, pela fundição e conformação mecânica. As vantagens sobre os demais processos têm incentivado a aplicação da metalurgia do pó em diversos setores produtivos, dentre elas destacam-se: maior flexibilidade no projeto de liga, possibilidade de eliminação ou redução das operações de acabamento, economia de matéria-prima, boa precisão dimensional e redução do consumo energético (Neves, 2005).

Segundo Thümmeler apud Klein (2004), sinterização é o transporte de matéria ativado termicamente, em uma massa de pós ou um compactado poroso, resultando na diminuição da superfície específica livre pelo crescimento de contato entre partículas, redução de volume e dos poros e alteração da geometria dos poros.

Materiais produzidos a partir do pó apresentam certa quantidade de poros como decorrência natural do processo. A quantidade, o tamanho e a distribuição de tamanho, bem como a forma, são controláveis pelos parâmetros do processo e pelas características do pó utilizado. (Klein, 2004)

O processo de fabricação de peças sinterizadas pode ser dividido em três etapas principais que influenciam o componente final: obtenção do pó de ferro (o processo e a granulação do pó); grau de compactação e a sinterização em si, levando em consideração o tempo, a temperatura, a pressão, entre outros.

Os processos de obtenção dos pós metálicos mais usuais são: mecânico, químico, eletroquímico, atomização. A escolha do processo de produção de pós é influenciada por fatores como consolidação, aplicação dos produtos e custo de fabricação. (Dourado, 2008)

A compactação visa consolidar pós e reduzir a fração de vazios (poros), elevando a densidade e aumentando a ligação entre partículas. Essa etapa influencia diretamente a resistência a verde do componente ainda não sinterizado e facilita o manuseio antes da sinterização.

A etapa final de fabricação é a sinterização, que consiste em aquecer as partículas de pó de pelo menos um dos constituintes majoritários a temperaturas inferiores ao ponto de fusão, com o objetivo de promover a

união entre partículas. Nesse processo, as áreas de contato formadas durante a compactação apresentam redução da área superficial e do raio de curvatura, podendo ocorrer perda do contorno original da partícula. A movimentação dos átomos leva à união das partículas formando *necks* que elevam a resistência do sinterizado. (Silva apud Dourado, 2008)

De maneira mais clara, o processo de sinterização em si pode ser subdividido em 3 estágios. O primeiro consiste na formação de contatos de sinterização, os contatos entre partículas formam pontes tornando a matéria contínua na região dos contatos; em tal estágio não há grande movimentação nem retração de partículas. O segundo estágio ou estágio intermediário consiste no aumento da relação raio do *neck*/raio da partícula onde consequentemente as partículas perdem gradativamente sua identidade. Neste estágio, o material apresenta duas fases contínuas: a fase sólida e a vazia, também nesta etapa ocorre a maior parte da retração do material. Como estágio final tem-se o isolamento, arredondamento e coalescimento dos poros.

A força motriz da sinterização é a redução da energia total do sistema associada às áreas de superfícies livres e às interfaces. Nos pós há um excesso de energia devido à elevada área de superfície, as tensões decorrentes dessas superfícies e interfaces tendem a diminuir pela redução da área. Em outras palavras, a energia para ocorrer a sinterização é proveniente da energia de superfície e quanto mais irregulares e finos os pós maior é a energia total. (Dourado, 2008)

A relação entre as tensões (σ) geradas pelas forças capilares e as tensões superficiais é dada pela equação de Laplace (equação 1).

$$\sigma = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Na qual:

γ = tensão de superfície

r_1 e r_2 = raios de curvatura de partículas em contato

As tensões calculadas pela relação de Laplace causam um gradiente no potencial químico entre as superfícies de diferentes raios de curvatura. As tensões na sinterização são de pequena intensidade e a movimentação atômica é o fenômeno dominante. A movimentação atômica nos pós de ferro, à temperatura ambiente, é pequena, no entanto, aumenta significativamente com a elevação da temperatura.

A equação de Arrhenius (equação 2) descreve os fenômenos de difusão atômica e mostra a dependência da temperatura com a movimentação atômica:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad \text{Equação 2}$$

Na qual:

D = difusividade [m^2/s],

D_0 = fator pré-exponencial (fator de frequência) [m^2/s],

R - constante universal dos gases [$\text{cal}/\text{mol}\cdot\text{K}$],

T - temperatura absoluta [K] e

Q = energia de ativação [cal/mol]

O controle adequado das temperaturas, do tempo e do ambiente de sinterização são os fatores que garantem ao material compactado uma melhor resistência mecânica e outras propriedades. (DeGarmo, 1997)

Em contrapartida a todos os benefícios do processo, dado o alto custo de produção de ferramental, o método só se justifica para produção de grandes volumes (DeGarmo, 1997). De forma geral, a metalurgia do pó aumenta o poder de competitividade das empresas tanto pela elevada qualidade e propriedades dos materiais assim obtidos, quanto pela tendência a modularização de componentes a fim de justificar o investimento para larga escala de produção.

Há quatro pilares que alicerçam a Ciência e Engenharia de Materiais: “Síntese e Processamento”, “Composição e Estrutura”, “Propriedades” e “Desempenho”. A combinação destes garante a produção de materiais com propriedades superiores e de melhor qualidade e desempenho. (German, 1984)

3.1.2 Influência da porosidade nas propriedades mecânicas

Após a conformação dos corpos verdes, é possível encontrar poros ou espaços vazios entre as partículas. Durante o processo de sinterização a maior parte da porosidade deverá ser eliminada; entretanto, é frequente a ocorrência de eliminação incompleta dos poros (Ribeiro, 2007).

A porcentagem, forma geométrica, distribuição e tamanho dos poros, afetam diretamente nas propriedades desses materiais. A possibilidade de se controlar os poros para otimização das propriedades mecânicas é o que impulsiona os estudos para compreensão de sua

relação, o que necessariamente passa pelo modelamento dos mecanismos envolvidos nessa relação (Yoshimura, et al., 2005).

Sobre a porosidade em si, qualquer porosidade residual terá uma influência negativa tanto sobre o comportamento elástico como sobre a resistência mecânica de qualquer material sinterizado (Callister, 2002) principalmente devido a dois fatores: os poros reduzem a área de seção reta ocupada pela fase sólida na qual a carga é aplicada e, os mesmo poros, agem como concentradores de tensões influenciando tanto no módulo de elasticidade como na resistência e tenacidade à fratura (Callister, 2002). Ainda segundo Callister (2002), para os materiais sinterizados mais usuais, a magnitude do módulo de elasticidade diminui em função da fração volumétrica da porosidade e a resistência à flexão diminui exponencialmente em função da mesma fração.

No caso da resistência a fadiga, em materiais porosos, seu valor decresce com o aumento da porosidade e com a diminuição do arredondamento dos poros (Palma, 1997). Em sinterizados porosos as melhores propriedades mecânicas são atingidas quando os poros são pequenos, arredondados e uniformemente distribuídos, e a quantidade destes varia de aplicação para aplicação. (Gessinger, et al., 1971) apud (Esper, et al., 1994)

A caracterização microestrutural de um metálico sinterizado, é um estudo pertinente ao curso de Engenharia de Materiais. Nesse trabalho, há o interesse apenas na medição do percentual volumétrico, tamanho e distribuição do tamanho, bem como o interesse em conhecer o fator de forma (ou grau de arredondamento) dos poros que serão detalhados no item 4.1.3. Tais informações são suficientes para uma boa caracterização das propriedades macrogeométricas do sinterizado.

3.1.3 Determinação do percentual volumétrico de poros

Segundo Rice apud Yoshimura (2005), há duas principais vertentes de modelos que preveem o efeito da porosidade na resistência dos materiais: modelos baseados em geometria ou área da seção transversal que suporta o carregamento, e modelos baseados em micro mecanismos que envolvem a concentração de tensão ao redor dos poros. Nessa dissertação, o modelo usado baseia-se na primeira opção citada.

No caso de peças, cuja geometria é irregular, a densidade geométrica pode ser obtida pela relação massa sobre volume (equação 3), sendo que o volume é dado pelas dimensões geométricas contidas no projeto e a massa medida em balança.

$$\rho_{pe\tilde{c}a} = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 3}$$

Assim sendo, a porosidade é dada pela equação 4:

$$Po(\%) = 100 \left[1 - \frac{\rho_{pe\tilde{c}a}}{\rho_{te\acute{o}rico}} \right] \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\rho_{pe\tilde{c}a}$ = Densidade da peça final sinterizada

$\rho_{te\acute{o}rico}$ = Densidade teórica do metal

A densidade bem como as propriedades mecânicas pode variar dentro de um PM. A localização das áreas críticas deve ser identificada através do projeto de engenharia, aplicando-se conhecimentos de mecânica dos sólidos e/ou usando softwares comerciais de análise numérica; por exemplo, ANSYS.

3.1.4 Análise quantitativa de poros e micro constituintes

A análise quantitativa dos poros permite a determinação do tamanho e distribuição espacial de tamanho de poros. Espera-se que, em todo material compactado e posteriormente sinterizado, a dispersão dos poros bem como o tamanho destes aumentem à medida que se afasta da superfície de compactação. Isto é, devido à perda de carga por atrito interno entre as partículas de pó, à medida que se caminha em direção ao centro da peça, maiores são os poros e maior é também o livre caminho médio entre estes.

As metodologias convencionais e mais documentadas de estimativa de porosidade são: o Método de Arquimedes e a porosimetria por intrusão de mercúrio. Mas de acordo com Diamond apud Moraes et. al., o método de Arquimedes é inapropriado para a determinação de micro porosidade e a metodologia de porosimetria por intrusão de mercúrio, além de desconsiderar poros fechados, subestima a macro porosidade e superestima a micro porosidade.

Outras maneiras de se estimar a porosidade são através de métodos microscópicos: pontual, linear e superficial.

Análise pontual

A análise pontual é feita através da justaposição de uma folha transparente com pontos equidistantes entre si sobre a imagem obtida microscopicamente; os pontos coincidentes com a fase analisada, no caso os poros, são contados e comparados com o total de pontos e convertidos em percentual. (Klein, 2004)

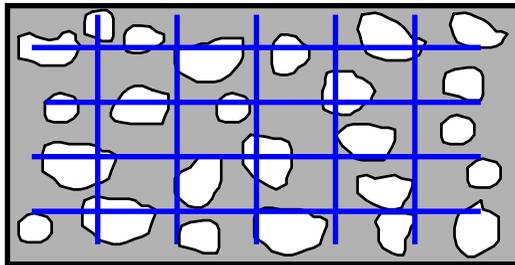


Figura 5 - Representação do método de análise pontual para avaliação quantitativa de poros superficiais.

Análise linear

Consiste no uso de linhas paralelas equidistantes auxiliares traçadas sobre a fotografia da microestrutura. Marca-se as interseções entre essas linhas ($l_1 + l_2 + \dots + l_n$) e a fase porosa e o comprimento total da linha é comparado com a soma das áreas entre interseções. (Klein, 2004)

(Equação 5)

$$\% \text{ Vol} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n^\circ \text{ de linhas} \cdot L}$$

Equação 5

Onde “L” é o comprimento das linhas.

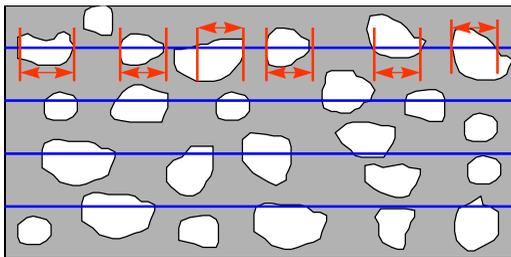


Figura 6 - Representação do método de análise linear para avaliação quantitativa de poros superficiais.

Análise superficial

Para o seguinte trabalho, faz-se opção pela análise superficial devido ao fato de ser um processo mais rápido e com maior acuracidade pois utiliza equipamento eletrônico para a realização das medições. Tal processo consiste em medir a área de todas as partículas da fase considerada e comparar com a área total da imagem através de um sistema de análise de imagens eletrônico. Dependendo do software utilizado, é possível determinar a área e o percentual de fases existentes além de permitir a obtenção do fator de forma das partículas via comparação da área destas com a de círculos (no plano). (Klein, 2004).

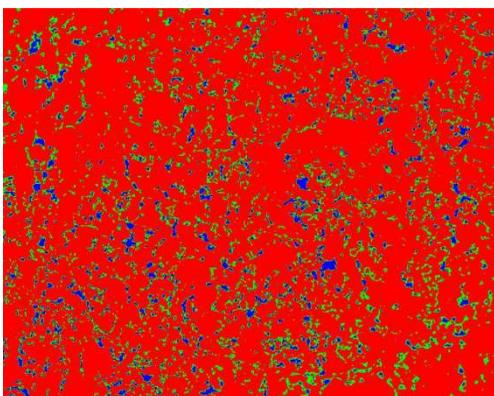
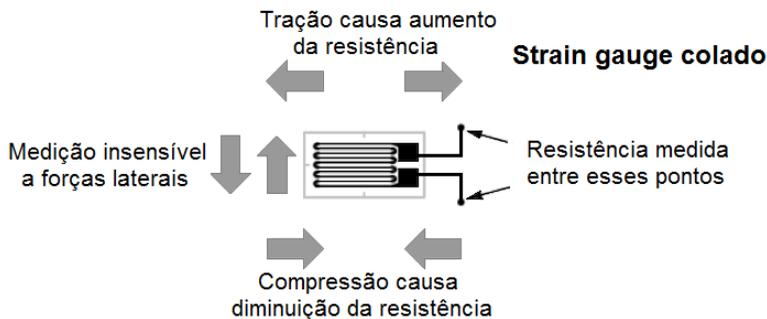


Figura 7 - Imagem microscópica da análise microgeométrica da alma da biela para determinação da porosidade da mesma.

3.2 TRANSDUTORES ELÉTRICOS - *CLIP GAGE*

A extensometria é uma técnica utilizada para análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas. Existem diversas maneiras e instrumentos através dos quais se pode realizá-la, entre elas: relógio comparador, detectores eletrônicos de deslocamento, foto elasticidade e *strain-gage*. O princípio do *strain-gage* ou do extensômetro consiste na transformação de uma deformação numa variação proporcional de sua resistência elétrica.



Fonte: KUPHALDT, 2004

Figura 8 – *Strain-gage* (fonte: Dissertação Rubia Teixeira)

Os primeiros transdutores elétricos, *strain gages*, que consistem de filamentos resistivos colados em membranas e que tinham sua resistência alterada com a deformação dessas estruturas surgiram no final da década de 30. (Garcia, et. al. Apud Teixeira,2009). Atualmente, a necessidade de medir pequenos deslocamentos lineares com grande acuracidade e confiabilidade tem incentivado o desenvolvimento de vários tipos de transdutores de deslocamento (Fleck apud.Teixeira, 2009). Para várias aplicações o *clip gage* tem distintas vantagens sobre um transdutor de deslocamento linear por voltagem, um medidor de capacitância e outros métodos interferométricos. O *clip gage* é pequeno, leve, robusto e barato.

Os *clip-gages* são também transdutores elétricos assim como os *strain-gages* e específicos para medir deslocamentos lineares de pequeno curso (campo de medida). Neste caso, o sinal devido ao deslocamento linear relativo a dois pontos é inicialmente amplificado por meio de sistemas mecânicos, alavancas, que causam a flexão em uma lâmina delgada cuja constante elástica k é conhecida e essas deformações elásticas na face da lâmina são medidas por meio um ou mais extensômetros de resistência elétrica (*strain-gages*).

Segundo da Rosa (2004), a avaliação dos esforços baseia-se na Lei de Hooke que relaciona os esforços aplicados, através da tensão gerada no material σ , com a deformação resultante ϵ , sendo E o módulo de Elasticidade. (Equação 6)

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Equação 6

Os *strain-gages* utilizados neste trabalho foram montados formando um circuito elétrico, a “ponte de Wheatstone”. A ponte de Wheatstone consiste de quatro braços resistivos e uma fonte de tensão. Os braços da ponte podem conter resistências fixas ou extensômetros (Carvalho, 2013). Em outras palavras, é um esquema de montagem de elementos elétricos (no caso *strain-gages*) capaz de realizar a medição da variação das resistências elétricas em seus braços do circuito o que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida. O circuito é composto por uma fonte de tensão, um galvanômetro e uma rede de quatro resistores, R_1 a R_4 , (Figura 9).

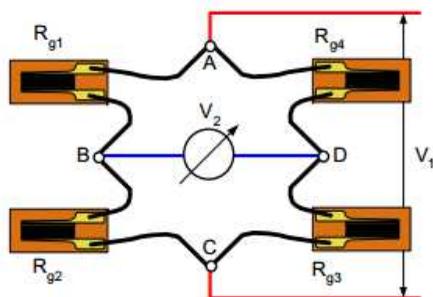


Figura 9 – Representação da ponte de Wheatstone (Fonte: Apostila de extensometria, Edison da Rosa (2004).

Explicando melhor seu princípio de funcionamento, se os nós A e C forem ligados a uma fonte de potência com tensão conhecida V_1 , aparecerá outra diferença de potencial V_2 entre os nós B e D. O valor de V_2 depende dos quocientes entre resistências R_1/R_2 e R_4/R_3 (Equação 7).

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right] = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad \text{Equação 7}$$

No caso do *clip-gage*, o circuito é alimentado por uma corrente elétrica através de uma fonte de energia. A deformação da peça provoca uma variação da resistência elétrica nos *strain-gages* levando a um desequilíbrio na ponte e como consequência uma variação de tensão ocorre na saída da ponte devido ao reequilíbrio da mesma (Teixeira, 2009). Essa variação de tensão elétrica passa por um amplificador de voltagem e é lida por uma placa de aquisição de dados. Esses dados coletados são processados e convertidos em grandezas específicas como micro deformação, tensão, força, etc.

A condição de equilíbrio da ponte de Wheatstone dá-se quando:
(Equação 8)

$$\frac{V_2}{V_1} = 0 \quad \text{Equação 8}$$

E tal condição se dá segunda a equação 9 :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ ou } R_1/R_2 = R_4/R_3 \quad \text{Equação 9}$$

Partindo do princípio de que uma dada ponte está em equilíbrio, qualquer variação de resistência em uma ou mais resistências da ponte provocará uma diferença de potencial V_2 diferente de zero. Assumindo também que a variação de resistência ΔR_i é muito inferior à própria resistência R_i , o que geralmente é sempre válido, então temos a equação 10 e a equação 11 para o caso de ponte completa (conforme foi utilizado neste trabalho):

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{Equação 10}$$

Ou

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad \text{Equação 11}$$

O *clip gage* aqui usado constitui-se de uma chapa delgada de aço (espessura $t = 1,2\text{mm}$), dobrada em formato de “U” cuja região central no plano perpendicular às hastes paralelas há uma redução de área (vide figura 10). Essa região central se torna a região mais sensível à deformação resultando numa maior deformação mecânica de modo a melhorar a performance e resolução do clip-gage. A fim de se obter uma maior sensibilidade esta mesma região foi removida e substituída por uma lâmina de aço mola (a mesma usava em válvulas de compressores herméticos para refrigeração) de espessura $t = 0,16\text{mm}$ onde está fixado quatro *strain gages*.

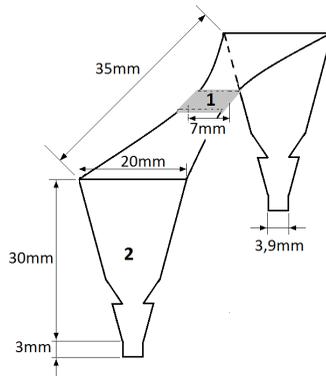
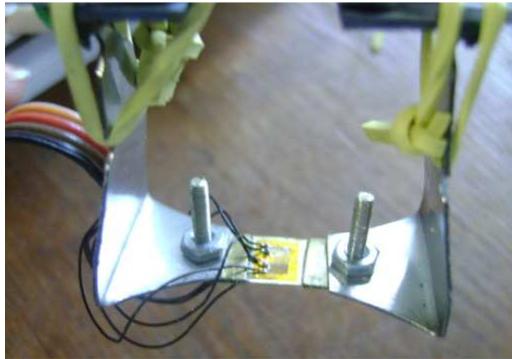
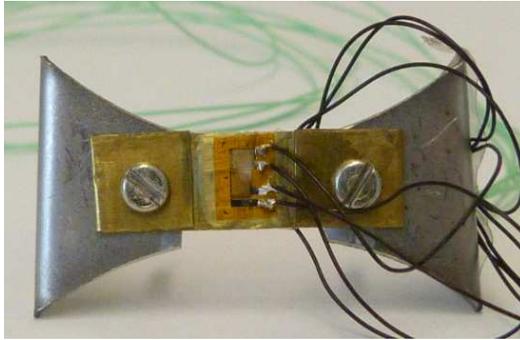


Figura 10 - Fotos e desenho esquemático respectivamente do *clip-gage* usado nos ensaios.

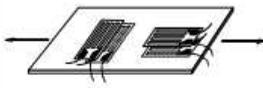
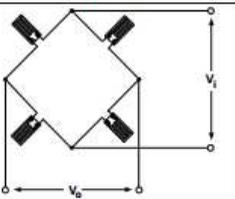
Configuração	S.G. ativos	Configuração da ponte	Sinal de saída
	4		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 \cdot (1 + \nu) K_G}{4} \epsilon$

Figura 11 – Configuração dos extensômetros no *clip-gage* usado nos ensaios.

No caso, nesse trabalho descrito, o sinal do deslocamento linear da peça é inicialmente ampliado por meio de sistemas mecânicos, alavanca das hastes paralelas da chapa em U, causando a flexão da lâmina delgada com a estricção convidativa à deformação. Em seguida, as deformações elásticas na face da lâmina são medidas por meio de um *strain-gage*, ligado em ponte completa.

A relação entre a deformação aplicada (ϵ) e a variação de resistência de um *strain-gage* é dada pela equação 12:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \epsilon \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

R_0 = resistência inicial do extensômetro

ΔR = variação da resistência por deformação

k = fator do extensômetro, *gage fator*, que é a sensibilidade do extensômetro (valor característico e fornecido pelo fabricante)

E ϵ é determinado pela relação (equação 13):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

ΔL = Variação do comprimento do CP (comprimento final menos o inicial).

L_0 = Comprimento inicial da barra.

3.3 TENSÃO E DEFORMAÇÃO (fundamentos)

3.3.1 Tensão

As forças podem ser classificadas como: forças externas (agindo sobre um corpo) ou forças internas (agindo entre duas partes de um corpo). No entanto, por conveniência, uma parte de um corpo livre qualquer pode ser retirada e assim qualquer força interna do membro original pode tornar-se uma força externa no corpo isolado livre. (Malvern, 1969).

As forças externas agindo a qualquer instante num corpo livre são classificadas segundo a mecânica do contínuo em: forças de corpo “b” (agem em elementos de volume ou massa dentro do corpo) e forças de superfície “t” (forças de contato agindo no corpo livre na sua superfície de contorno).

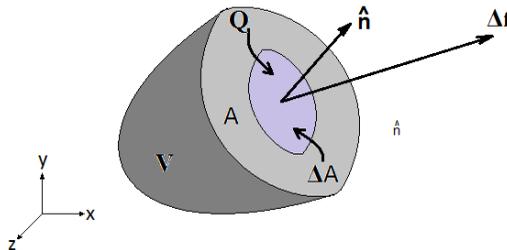


Figura 12 - Força superficial Δf sobre uma área ΔA .

Considerando a figura 12 sobre o eixo de coordenadas XYZ, pode-se caracterizar o vetor tensão como sendo dado pela equação 14:

$$\mathbf{t} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta \mathbf{f}}{\Delta A} \right]_{(\mathbf{k})} \quad \text{Equação 14}$$

O vector tensão em um plano arbitrário com \hat{n} normais de um ponto pode ser expresso em termos dos três vetores de tensão $t^{(k)}$. Estes três vetores são, portanto, uma representação do tensor tensão T no ponto, e a função de vector linear é associar a cada argumento do vector unitário \hat{n} o vector tração $t^{(n)} = \hat{n} \cdot T$ agindo através da superfície cuja normal é \hat{n} .

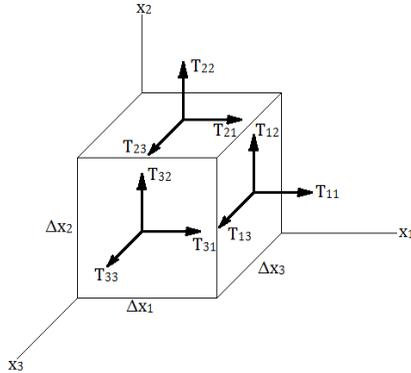


Figura 13 - Componentes de tensão (Fonte: Malvern pag. 72)

Baseado na figura 13, pode-se afirmar que (equação 15):

$$\underline{t}^{(i)} = T_{ij} \hat{t}_j \quad \text{Equação 15}$$

Onde $\underline{t}^{(i)}$ é o vetor tensão na face direcional i.

3.3.2 Deformação

Em um ensaio de tensão uniaxial de um metal elástico, a deformação é geralmente definida como a mudança no comprimento por unidade de comprimento inicial. De outro modo:

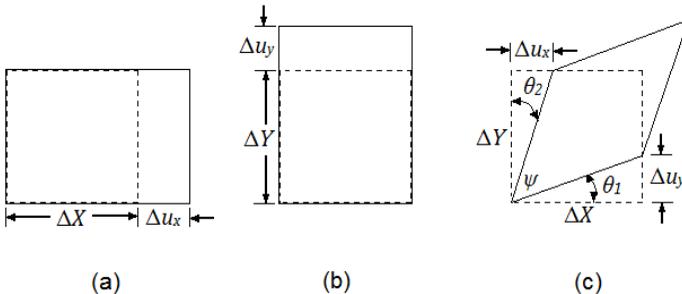


Figura 14 - (a) Deformação uniaxial na direção x, (b) Deformação uniaxial na direção y, (c) Torção pura sem rotação. (Fonte: (Malvern, 1969))

Onde, para (a) e (b) respectivamente (equação 16):

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u_x}{\Delta x} = \frac{\partial u_x}{\partial x} ; \epsilon_y = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u_y}{\Delta y} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \text{Equação 16}$$

E (c) segundo a equação 17:

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 17}$$

O deslocamento relativo unitário (equação 18) é dado por $\frac{du}{dS}$, sendo:

$$\frac{du}{dS} = \underline{u} \cdot \underline{\nabla} \cdot \underline{\hat{n}} = J_u \cdot \underline{\hat{n}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde J_u é a matriz Jacobiana ou também conhecida como tensor gradiente de deslocamento.

A matriz Jacobiana pode ser decomposta como a soma de 2 matrizes: a deformação ($\underline{\underline{E}}$) + a rotação ($\underline{\underline{\Omega}}$).

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração avaliam diversas das propriedades mecânicas dos materiais acima descritas. O procedimento experimental consiste na deformação de uma amostra de determinado material até a sua fratura. Essa fratura se dá devido à aplicação de tração, gradativamente crescente e uniaxialmente ao longo do eixo de maior comprimento de um corpo de prova. (Domeneghetti, 2011).

Há dois tipos usuais de corpos de prova padrão: os de secção circular e os de secção retangular.

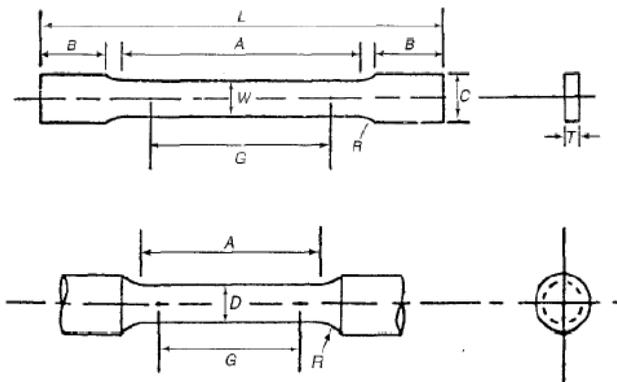


Figura 15 - Tipos mais usados de corpos de prova para ensaio de tração (Fonte: Holt apud Domeneghetti)

Em função da metodologia e da proposta de ensaios neste trabalho abordados, os corpos de prova utilizados nos experimentos foram feitos de acordo com a norma ASTM *International STP1418 – Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume*, que permite outras formas geométricas para ensaios de tração quando se trata de corpos cuja área perpendicular ao sentido de esforço trativo for menor que 2mm^2 .

Como resultado do teste: a curva Tensão-Deformação, da qual é possível obter grande parte das propriedades mecânicas.

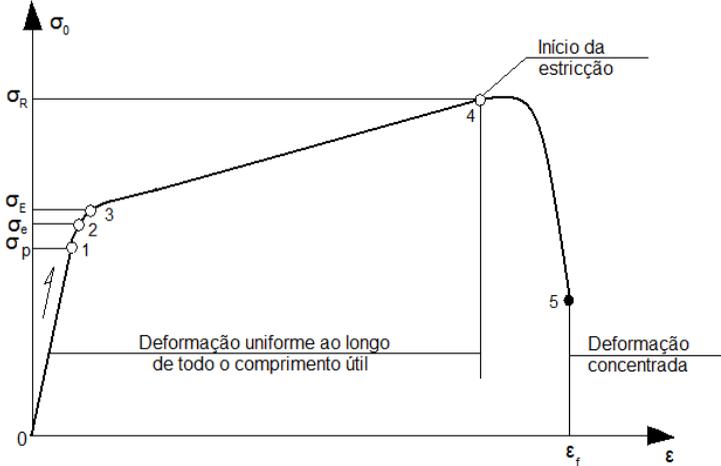


Figura 16 - Principais informações obtidas a partir de um diagrama tensão-deformação convencional (curva de engenharia) (FONTE: Apostila do prof. Edison da Rosa)

Legenda: 0-1: porção linear da curva (onde vale a lei de Hooke); 1: ponto correspondente ao limite de proporcionalidade; 2: ponto correspondente ao limite elástico; 3: ponto correspondente ao limite de escoamento; 4: ponto de carga máxima (início da instabilidade); 5: ponto de ruptura final.

3.4.1 Propriedades mecânicas

Segundo Steuer e Rübenach apud Esper e Sonsino (1994), um material metálico sinterizado pode ser subdividido em duas fases: um material sólido e os poros. Ambas as fases determinaram as propriedades do sistema operacional do material.

A perda de resistência devido aos poros pode ser compensada pela adição de elementos de liga. Esses elementos concentram-se nos

arredores dos poros, melhorando assim a resistência em escala local (Verdu, et al., 2001). Segundo a MPIF (2007), esse tipo de microestrutura é especialmente vantajosa em matéria de desempenho quanto à fadiga.

A seleção do critério de falha está relacionada às seguintes características do material: dureza (densidade), dados de mecânica da fratura, resistência ao impacto e alongamento, limite de resistência à tração, resistência ao escoamento (estático e cíclico), módulo de Young, limite e resistência à fadiga (Esper & Sonsino, 1994) dentre as mais relevantes.

Algumas das características acima serão abordadas a seguir de maneira sucinta de acordo com a MPIF.

Alongamento

O alongamento é expresso como uma porcentagem do comprimento original (equação 19). É baseado na medida do aumento da distância entre marcas após a fratura, contanto que a fratura ocorra nos limites do comprimento marcado.

$$\Delta l = \frac{l-l_0}{l_0} * 100\% \quad \text{Equação 19}$$

A deformação, ou alongamento por unidade de comprimento é dada pela equação 13.

O alongamento também pode ser medido com um extensômetro “break-away” do tipo tração. A curva tensão-deformação registrada apresenta alongamento total (elástica e plástica).

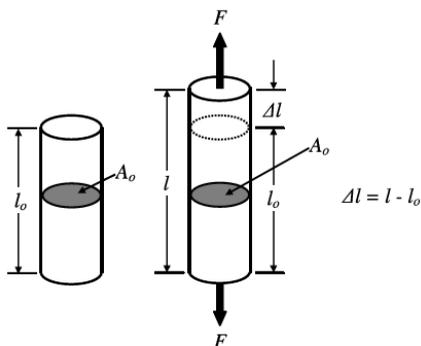


Figura 17 - Alongamento de uma barra cilíndrica de um material metálico submetido a uma carga de tração uniaxial.

Limite de resistência à tração

O limite de resistência a tração é a capacidade de uma amostra em teste resistir à fratura quando uma força de tração é aplicada na direção paralela ao seu eixo longitudinal. É igual ao carregamento máximo dividido pela área da seção transversal original (equação 20).

$$\sigma_t = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad \text{Equação 20}$$

Módulo de elasticidade (módulo de young) (E)

É definido como a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, sendo a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente; sendo que tensão corresponde a uma força ou carregamento, por unidade de área, aplicada sobre um material, e deformação é a mudança nas dimensões, por unidade da dimensão original (Callister, 2002). Assim, o módulo de Young é dado pela equação 21:

$$\sigma_{ij} = E \varepsilon_{ij} \quad \text{Equação 21}$$

Onde :

σ_{ij} = Tensor tensão

ε_{ij} = Tensor deformação

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais, dependente da composição química, microestrutura e defeitos (poros e trincas).

Segundo Aguilar (2006), metalurgicamente, o módulo de Young está relacionado à energia de ligação e ao fator de empacotamento do arranjo atômico. Comumente é determinado, macroscopicamente via ensaios de tração ou compressão, usando a curva tensão-deformação. Esse valor é uma aproximação razoável do módulo de Young para materiais que obedecem a Lei de Hooke, desde que se tenha uma velocidade de deformação controlada, uma máquina rígida e corpos-de-prova homogêneos.

A determinação do módulo de Young em materiais porosos sinterizados é normalizada pela ISO 3312 referente especificamente ao módulo de elasticidade.

Dureza

A dureza de uma estrutura composta de pós metálicos no estado pós-sinterização é uma função da sua densidade, composição química e microestrutura. Em função de seus poros residuais, o valor da dureza medida é referido como a dureza aparente. Para peças sinterizadas, o teste de dureza usado é o Brinell (dureza HB). (Esper & Sonsino, 1994).

Essa dureza aparente é causada pela diferença na estrutura do material. Os valores brutos de dureza obtidos por métodos de indentação, Rockwell e Vickers, em metais forjados e PM não podem ser comparados diretamente. Isso porque o penetrador entra cada vez mais na estrutura porosa do sinterizado, dado assim um valor de dureza menor do que a dureza intrínseca do metal em si. Portanto, valores de dureza para *powder materials* (PM) quando obtidos via testes de macro dureza, são referidos como de “dureza aparente”, pois apresentam o efeito combinado da porosidade e dureza das partículas de metal.

Como dito anteriormente, a densidade, assim como as propriedades mecânicas podem variar ao longo da peça sinterizada; assim sendo, as regiões críticas devem ser identificadas no projeto. (MPIF Standard 35,2007)

A densidade em aços sinterizados varia de acordo com a pressão de compactação usada no pó além de ser também afetada por alguns parâmetros de processamento da peça. Não só as propriedades mecânicas, mas também algumas das principais propriedades físicas são afetadas pela densidade. Por exemplo, o módulo de elasticidade e a condutividade térmica aumentam significativamente com o aumento da densidade, enquanto que o coeficiente de Poisson e a dilatação térmica também aumentam, porém mais lentamente.

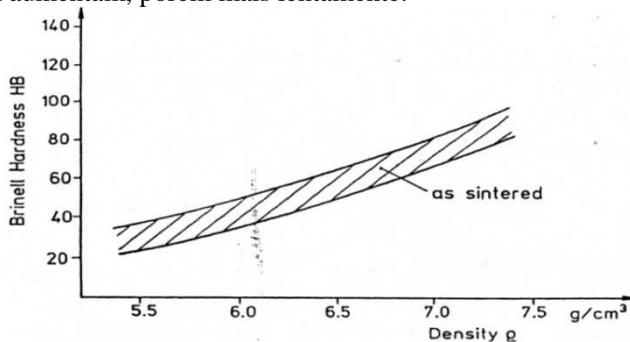


Figura 18 - Gráfico de dureza de um metal PM em função da densidade (FONTE: Livro Fatigue Design for PM components. Esper & Sonsino)

Resistência ao escoamento sob compressão

A resistência ao escoamento sob compressão é expressa em [MPa] e representa a tensão que o material apresenta sob uma deformação compressiva permanente especificada. A medição do deslocamento é feita através da utilização um extensômetro do tipo “clip-on”.

Limite de resistência à fadiga

Quando um metal é submetido a ciclos repetidos de tensão ou deformação, há formação de uma fissura progressiva em sua estrutura, o que leva à ruptura. Tal comportamento é chamado fadiga e, geralmente, é responsável por um grande percentual de falhas em peças sujeitas a carregamento cíclico. Nesses casos, ocorre ruptura com um esforço menor que o limite de escoamento do material. (Hibbeler, 2004)

Limite de fadiga é a tensão limitante abaixo da qual não se detecta evidência de falha após se aplicar a carga especificada durante um grande número de ciclos. Na literatura, há inúmeros artigos atuais referentes a tal limite, tanto a alto quanto a baixo ciclo. Alguns destes estão listados nas referências bibliográficas.

O valor nominal dessa tensão é determinado submetendo-se corpos de prova, cada um, a uma tensão máxima especificada até chegar à ruptura em uma máquina de teste.

O resultado é obtido através de um gráfico S-N (tensão – número de ciclos) em escala logarítmica, onde o número de ciclos vai até a ruptura.

Devido à heterogeneidade característica do material, resultante do processo de fabricação, pode haver a necessidade de um tratamento probabilístico dos resultados experimentais.

3.5 MODOS E CRITÉRIOS DE FALHA

Segundo da Rosa (2002), de um modo genérico, a falha pode ser definida como a incapacidade de um componente corresponder à demanda que lhe é exigida, ou seja, a sua solicitação é maior que a resistência.

As teorias (critérios) de falha (resistência) procuram em geral estabelecer uma tensão equivalente (ou tensão de comparação) (Figura 19b), de forma a possibilitar a comparação com os resultados de esforços uniaxiais obtidos por ensaios comuns de tração ou de compressão (Norton, 2004).

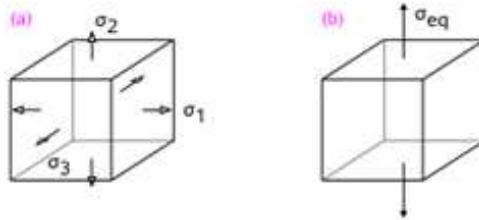


Figura 19 - (a) estado triaxial de tensões, graficamente representado pelas tensões principais; (b) tensão equivalente.

A determinação do critério de falha esta diretamente relacionada ao modo de falha do componente. Os modos de falha se dividem em duas classes: dependentes e independentes do tempo, ou seja, por acúmulo de dano e por sobrecarga respectivamente.

MECANISMO DE FALHA	MODOS DE FALHA
Acumulo de dano (depende do tempo)	Desgaste Fadiga Corrosão sob tensão Fluência
Sobrecarga (independe do tempo)	Início de Escoamento Colapso plástico Flambagem Ruptura frágil Ruptura dúctil

Tabela 1 – Relação mecanismo de falha com modos de falha

Por definição (da Rosa, 2002), critério de falha é a representação do mecanismo de falha com variáveis macroscópicas quantificando o mecanismo. Os critérios de falha são determinados a partir do tipo de material: frágil ou dúctil.

MATERIAL	CRITÉRIOS DE FALHA
Dúctil	Teoria da Tensão de Cisalhamento Máxima (Tresca) Teoria da Energia de Distorção Máxima (von Mises)
Frágil	Teoria da Tensão Normal Máxima (Rankine) Critério de Falha de Mohr

Tabela 2 - Relação característica do material com critério de falha

Os critérios (exceto fadiga) referem-se sempre às tensões principais e o material estudado é supostamente isotrópico. Portanto, se uma direção genérica for dada, esta deverá ser transformada em direções principais (Norton, 2004).

A tabela 3 associa de forma sucinta e objetiva o modo, o mecanismo e o critério de falha.

MODO DE FALHA	MECANISMO DE FALHA	CRITÉRIO DE FALHA
Fratura Frágil	Clivagem Solicitação σ resistência σ_{cl}	Rankine (Máx. Tensão Normal) (Círculo de Mohr) $\sigma_1 : \sigma_{cl}$ (sem presença de defeitos)
Fratura Dúctil	Início de Escoamento Continuidade do escoamento (nucleação, crescimento e coalescimento de vazios) Cisalhamento final	Limite na deformação $\epsilon_{eq} : \epsilon_f^*$ (exato) $\epsilon_{eq} : \epsilon_f$ (Aprox.) Limite na tensão $\sigma_{máx} : \sigma_f$ (aproximado)
Início de Escoamento	Deformação Plástica (resultado do escorregamento de planos atômicos; movimento de discordâncias)	von Mises (Máx. Energia de Distorção) $\sigma_{eq} : \sigma_E$ (início da deform. plástica) Tresca (Máx. Tensão Cisalhante) $\tau_{max} : \tau_E$ (continuidade da deformação)
Colapso Plástico	Deformação Plástica (resultado do escorregamento de planos atômicos; movimento de discordâncias)	von Mises (Máx. Energia de Distorção) $\sigma_{eq} : \sigma_E$ (início da deformação plástica) Tresca (Máx. Tensão Cisalhante) $\tau_{max} : \tau_E$ (continuidade da deformação)
Fadiga	Nucleação da trinca Propagação da trinca Ruptura final	Depende do critério de projeto (ex: projeto para vida finita; infinita; falha em segurança; etc.)

Tabela 3 – Relação modo, mecanismo e critério de falha (FONTE: dados de aula de Fratura e Fadiga, Edison da Rosa, 2009)

Tratando-se de fadiga e desgaste, em qualquer projeto, um dos pontos fundamentais é determinar, experimentalmente ou não, a resistência à fadiga do material. Essa resistência deve ser compatível com o critério de projeto adotado. Assim sendo, dependendo do tipo de aplicação pode-se necessitar de informações quanto à resistência à nucleação de trincas de fadiga, ou então a resistência à propagação destas trincas.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados de formas diversas: variando-se a tensão em ensaio de flexão rotativa; variando-se a deformação em ensaios com deformação controlada; e até mesmo em testes axiais de tração-compressão, torção cíclica ou de flexão plana. O tipo de ensaio é determinado a partir do tipo e das características do material.

As curvas obtidas são usualmente tensão *versus* número de ciclos e deformação *versus* número de ciclos.

A análise de fadiga experimental de caracterização da resistência à fadiga do produto justifica-se no caso onde o volume de produção é suficientemente elevado ou se um alto grau de segurança for exigido. (da Rosa, 2002).

4. METODOLOGIA

4.1 PRIMEIRA METODOLOGIA

O alicerce do presente trabalho é o fato da biela ter como característica a heterogeneidade e anisotropia de suas propriedades mecânicas; isto é, apresenta diferentes propriedades em diferentes pontos sob esforços aplicados em diferentes sentidos.

A rotina de estudo foi dividida em 3 passos: análise ótica da porosidade, análise numérica e experimental da biela, e confronto dos resultados.

4.1.1 Análise ótica da porosidade

A análise ótica tem por objetivo garantir um resultado final denso e completo do trabalho através do mapeamento da estrutura da biela via varredura de sua porosidade e continuidade desta, baseado na norma MPIF (*Metal Powder Industries Federation*).

No total, foram usadas 16 bielas de um mesmo lote, todas segmentadas ao meio para análise da porosidade. Seis bielas foram seccionadas paralelamente ao plano de compactação (Figura 21 plano B) e outras sete no plano paralelo ao sentido de compactação e ao sentido do eixo do compressor (Figura 20), e outras três bielas foram seccionadas segundo a figura (Figura 21 plano A) para confirmação dos resultados da distribuição de poros ao longo do sentido de compactação.

De cada biela foi possível avaliar dois planos e para verificar a consistência dos dados a mesma região foi analisada três vezes em bielas diferentes.

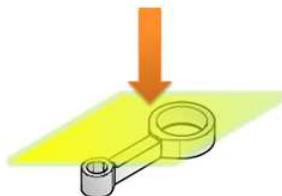


Figura 20 - Desenho esquemático do sentido de compactação do pó no processo de fabricação da biela sinterizada.

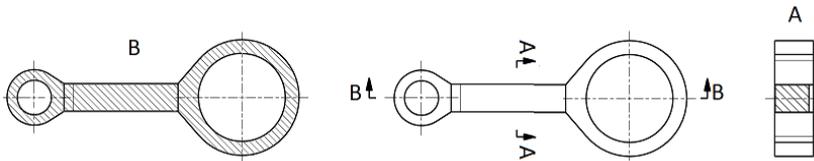


Figura 21 - Cortes nos planos A (X-Z) e B (Y-Z) feitos na peça para avaliação da distribuição de poros ao longo da alma da biela.

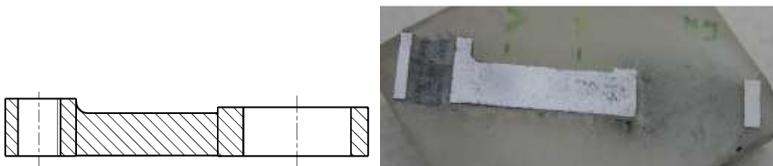


Figura 22 - Corte feito no plano X-Y para avaliação da distribuição de poros ao longo da alma da biela.

Os estágios para análise ótica superficial de porosidade são: seccionamento da amostra, embutimento do corpo, lixamento e polimento da superfície, ataque químico (quando necessário) e avaliação.

Corte da amostra

A análise de porosidade superficial requer certo cuidado quanto a real tamanho e quantidade de poros. A velocidade de avanço da ferramenta de corte e a temperatura da mesma pode fazer com que haja deformação do material levando à falsa impressão de porosidade baixa e/ou ausência de poros.

Levando-se em conta tal fator, as bielas foram seccionadas a frio com discos diamantados, a baixa velocidade e com injeção direta de fluido refrigerante na tentativa de minimizar a deformação na superfície de corte do material.

Embutimento do CP

Usualmente o embutimento é feito em baquelite, um material de baixa dureza e de fácil lixamento e polimento. Porém, se o operador não tiver o domínio sobre a técnica de lixamento vários planos se formarão e a análise não fornecerá resultados qualitativos.

Algumas bielas usadas em compressores herméticos, tal qual a que está sendo avaliada, recebem tratamento superficial e deposição de material. A fim de não danificar a superfície e garantir uma planificação mais reta possível (sem vários planos), as amostras foram embutidos em resina acrílica transparente (mesma utilizada em odontologia para fabricação de aparelhos ortodônticos).

Os planos a serem avaliados foram colocados em contato com uma superfície de vidro coberto com uma fita de poliacetal. O poliacetal entre o vidro e o CP garantiu que os mesmos não ficassem grudados quando a resina cobrisse o corpo de prova. (Figura 23)

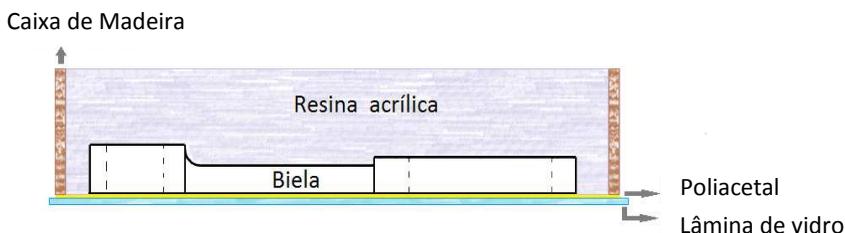


Figura 23 – Desenho esquemático do processo de embutimento utilizando resina acrílica.

Utilizou-se uma resina do tipo auto-polimerizante, também conhecida em odontologia como “resinas rápida”. Esse composto dá-se a partir da reação química entre o monômero de metil metacrilato (parte líquida) e o polímero de metil-metacrilato (pó acrílico ou resina acrílica).

O líquido acrílico exposto ao calor e à luz tende a endurecer (polimerizar). Para obter um bloco com boa translucidez e solidificação, a mistura acrílica ainda líquida foi despejada na caixa em partes, de

modo a formar uma fina lamina curada e com repetição do processo até que peça estivesse completamente coberta e embutida em resina.

Lixamento e polimento do plano em análise

Após embutidas, as partes foram submetidas a 5 graduações de lixa, 2 polimentos com pasta de sílica e à limpeza de resíduos. Tal etapa tem o objetivo de destacar as fases existentes na área em análise (os poros, ferritas, etc).

A preparação para o processo de lixamento requer primeiramente a limpeza da superfície a ser trabalhada com álcool etílico de modo a retirar qualquer impureza que pudesse provocar sulcos profundos no plano a ser lixado.

As lixas de SiC n°: 1000, 800, 500, 320 e 220 (da mais grossa à mais fina respectivamente) foram acopladas a discos giratórios sobre os quais os corpos foram pressionados a fim de formar um único plano para análise. Para garantir a planicidade, em cada lixa o corpo era pressionado em apenas um sentido e a cada troca de granulação de lixa a superfície era lixada a 90° de defasagem em relação ao sentido de lixamento anterior. (Figura 24).

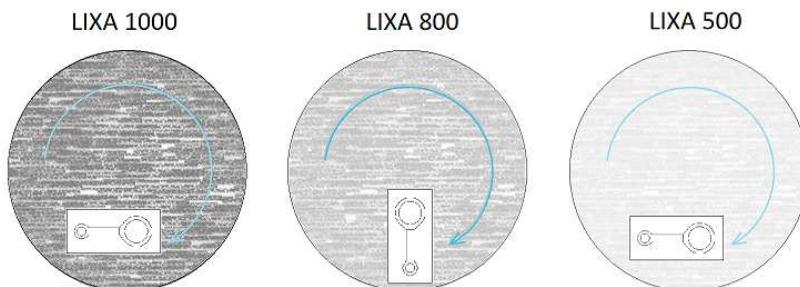


Figura 24 – Desenho esquemático do processo de lixamento.

Após a passagem pela última lixa, a n°220, o plano é novamente limpo com álcool etílico e secado para retirada de qualquer resíduo que possa contaminar a folha de polir.

Na sequência, para o polimento, repetindo o processo anterior, aplicam-se pequenas gotas dispersas da pasta de sílica sobre o disco veludo além de álcool para evitar que haja dano ao veludo. Ao final, novamente a superfície é limpa e como resultado tem-se uma superfície espelhada pronta para análise no microscópio.

Avaliação da distribuição de poros

As amostras foram submetidas a um microscópio com capacidade de ampliação de imagem na escala de 100 vezes. Este estava acoplado um computador para aquisição de imagem onde se encontra o software comercial IMAGO® para análise da porosidade e densidade.

O programa fornece como dados de saída: as fases de ferrita, ferrox (camada de óxido estável) e poros; o número de regiões; quanto cada região representa percentualmente e soma das áreas de cada fase (Figura 25). Conhecendo a área total analisada mais as informações adquiridas, é possível determinar a porosidade média da região e conseqüentemente a densidade, sendo que, a densidade do material maciço é conhecida pelas tabelas de propriedades dos materiais.

c11-100x.jpg	c11-100x_Out *	PorosidadeThais_Reg *	PorosidadeThais_Fld *		
	Numberofregions	Areapercent	ImagePhaseIndex	ImagePhaseName	Areasum[μm^2]
	181.00	88.26	1	Ferrita	1332865.21
	2366.00	8.72	2	Ferrox	131633.09
	1515.00	2.97	3	Poros	44853.98

Figura 25 - Principais fases e área percentual das mesmas encontradas na área referente à Figura 7 (FONTE: testes realizados pela mestranda no laboratório de materiais da Embraco).

4.1.2 Análise numérica

Para a avaliação numérica, optou-se pelo uso do software comercial *Ansys v.13.0*. Através do seu recurso “DM” (*DesignModeler*) para cada área mapeada é possível inserir como dado de entrada uma propriedade específica, segmentando a peça em várias pequenas regiões. Desta maneira, as pequenas partes são consideradas regiões homogêneas individualmente de forma que, a biela como um todo, leve em consideração na análise as propriedades heterogêneas.

As propriedades específicas são as que foram coletadas através da análise ótica e fornecidas pelo programa IMAGO®.

Tendo a biela caracterizada, com propriedades locais definidas, fixar-se-iam as condições de contorno do modelo e do conjunto (biela, pistão, cilindro) baseado no modo de operação da biela dentro do compressor em funcionamento.

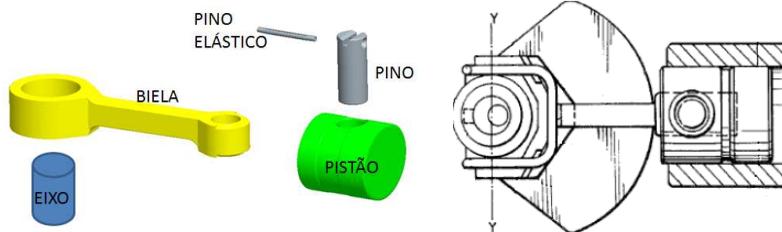


Figura 26 – Montagem do conjunto biela-pistão-cilindro.

4.1.3 Análise experimental

O trabalho é baseado no confronto de resultados numéricos e experimentais.

Em paralelo à análise numérica, seriam realizados ensaios de tração e flexão na biela física. Para ensaios de tração, seriam utilizados equipamentos de tração com controle de deslocamento e/ou deformação junto um *clip-gage* associado ao equipamento EMIC e a Spider (sistema de aquisição de dados).

4.1.4 Confronto de resultados

Confrontando os resultados obtidos experimental e numericamente, ter-se-ia assim a validação ou não do método de caracterização de sinterizados em função da distribuição de porosidade.

Porém, já na primeira etapa de análise ótica, os resultados encontrados referentes à distribuição de poros não foram condizentes com o esperado segundo as teorias de distribuição porosa de materiais metálicos sinterizados.

Resultados que inviabilizaram o trabalho inicial proposto

Em se tratando de componentes sinterizados, os estudos mostram que a distribuição da densidade da peça final deve apresentar um centro menos denso que as superfícies de compactação.

Entretanto a análise micrográfica da alma da biela mostrou resultados diferentes ao esperado: maior porosidade na região marginal e menos percentual de poros na região central da alma da biela.

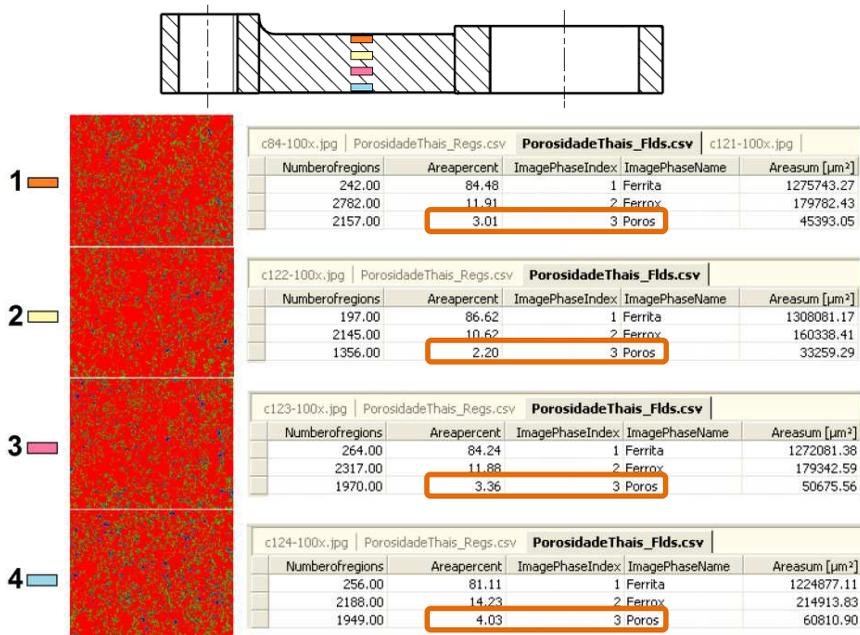


Figura 27 – Resultados obtidos através do software IMAGO® da análise microgeométrica da porosidade da alma de uma das bielas e seus respectivos posicionamentos na biela. As medições foram feitas até a metade da espessura da alma pois se acreditava que a porosidade seria simétrica

Biela	Poros (posição) [Somatória áreas [µm²]]			
	1	2	3	4
1	44853,98	43061,94	23199,52	49547,79
2	27298,98	25016,37	27769,27	34031,82
3	38173,02	24401,73	23924,68	29675,21
4	41326,29	30425,18	28981,63	32485,64
5	25162,98	13605,51	16897,49	31829,27
6	38451,58	21358,97	24822,39	34132,19
7	7361,01	6091,13	8876,74	13686,71
8	19132,75	62690,55	37611,39	49472,22
9	98469,66	55972,74	37780,55	74418,67
10	41757,10	42199,19	58474,15	73998,01
11	7822,27	9295,14	8703,06	12362,70
12	45393,05	33259,29	50675,56	60810,90
13	63823,20	49685,37	67362,16	85135,94

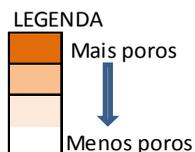


Figura 28 – Resultados da análise de 13 superfícies, obtidos através do software IMAGO® da análise microgeométrica da porosidade da alma de uma das bielas e seus respectivos posicionamentos na biela.

Buscando uma resposta para a divergência dos resultados quando comparado ao esperado, reavaliou-se todo o processo de fabricação da biela.

As tolerâncias dimensionais deste componente são da ordem de micrometros e para garantir que a peça está dentro das dimensões, o componente depois de sinterizado passa por uma nova compactação para ajuste de tolerâncias o que pode ser uma das causas da alteração da porosidade.

Além deste fator, o percentual de poros obtidos pelo *software* não reproduz a realidade do componente. Isso porque a porosidade na ordem de 3% é abaixo do valor usual de processo e desconhecido até então para tal processo de fabricação utilizando este material metálico. Provavelmente o real percentual poroso é representado pelo valor percentual dos poros mais o percentual de ferro encontrado.

Em função do equívoco na interpretação dos resultados de porosidade encontrados e devido ao trabalho idealizado não levar em consideração no cronograma um maior aprofundamento na questão de fabricação do componente; assim sendo a técnica foi descartada e uma nova metodologia foi desenvolvida para a atual dissertação.

Tal estudo tardou cerca de três meses entre preparação dos corpos de análise (cortes, polimento, ataque químico, avaliação microscópica, análise dos resultados mais conclusão).

4.2 SEGUNDA METODOLOGIA (NOVO MÉTODO EXPERIMENTAL)

Devido à complexidade de caracterização da distribuição dos poros por análise óptica, a solução encontrada foi a determinação das propriedades via ensaios mecânicos.

Inicialmente almejava-se realizar ensaios estáticos de tração e compressão além de dinâmicos (ciclo de vida). Porém, o trabalho se tornaria muito extenso e complexo não se encaixando ao prazo de uma defesa de mestrado. Assim sendo, toda a parte experimental foi focada em analisar as propriedades mecânicas obtidas através de ensaios de tração, porém em corpos de prova diferenciados do padrão usual.

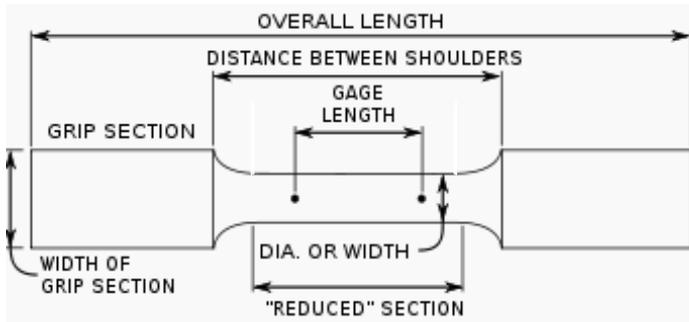


Figura 29 – Nomenclatura das partes do corpo de prova padrão

De acordo com norma ASTM *International* STP1418, os ensaios de tração podem ser realizados em corpos de prova de até 2mm^2 , mas nada especificado a componentes sinterizados.

Assim sendo, uma maneira de se caracterizar a porosidade da biela experimentalmente é através do seu seccionamento em corpos de menor área transversal possível de forma que a distribuição de poros ao longo das amostras seja o mais próximo de ser homogênea.

Baseado no conhecimento das análises numéricas já realizadas, no trabalho do mestre Sebastian Götz e da possibilidade de uso de corpos de provas miniaturizados fundamentado na norma ASTM de provas de tração em corpos delgados, desenvolveu-se a ideia de determinar as propriedades da biela, cuja alma tem área de secção igual a 45mm^2 , seccionando-a em 16 CPs com área de $1,44\text{mm}^2$ os mais homogêneos possíveis em relação a sua distribuição de poros. (Figura 31)

A área do plano tracionado é reduzida a 1/16 de sua área inicial, limitando assim grandes transições de propriedades. (Vide Figura 31).

Todo o trabalho nessa dissertação descrito usou como metodologia experimental o procedimento acima citado.

4.2.1 Análise experimental

Aparato experimental

- 3 bielas sinterizadas (A, B e C) utilizada em compressores herméticos de onde foram extraídos 48 corpos de prova (16 de cada com nomenclatura conforme Figura 44);
- Equipamento de corte a laser;
- Suporte base para os corpos de prova (Figura 32);
- Placas planas quadradas de 10 x 8,5 x 1mm;
- Cola cianoacrilato
- Máquina EMIC para ensaio de tração (Figura 38);
- Células de carga para até 500N calibradas e certificadas (Figura 38 anexo A);
- *Clip-gage* (Figura 37 Apêndice B);
- Sistema Spider para aquisição de sinal;

Manufatura e montagem dos corpos de prova



Figura 30 - Foto da biela original comparada ao tamanho de uma caneta.

Como dito previamente, para obtenção dos CPs, seccionou-se a alma da biela em 16 espécimes de área igual a $1,44\text{mm}^2$ (Figura 35)

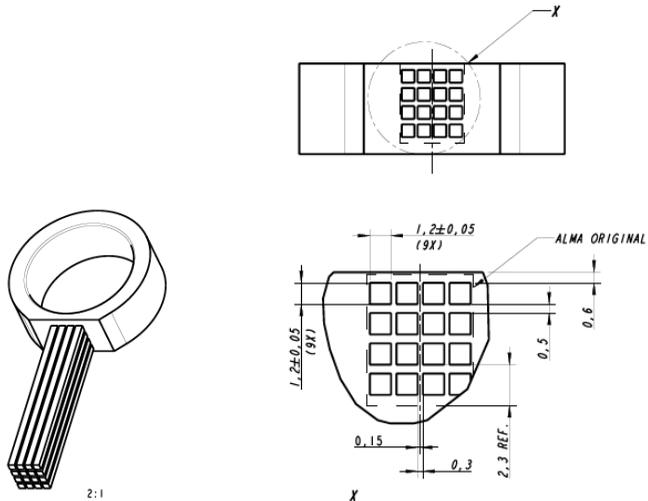


Figura 31 - Desenho da biela e dos 16 CPs extraídos da mesma.(Apêndice A)

Os cortes foram feitos pela ferramentaria da Embraco com um equipamento de corte a fio devido aos seguintes fatores:

- O processo garante maior precisão dimensional ,
- Menos perda de material quando comparado a processo usuais como o de corte a disco diamantado e/ou serra.
- Redução do risco de escorregamento de material que pode vir a cobrir os poros e que, de alguma forma, podem interferir nas propriedades mecânicas do material.

Mesmo o processo de corte a fio garantindo elevada precisão dimensional, a fim de garantir que os resultados não sofressem influência de fatores externos como diferença de espessura entre CPs, 100% dos corpos sofreram medição em 3 pontos: extremos e meio, para avaliação de qualquer variação dimensional.

A fixação das partes ensaiada ao equipamento de tração requer o uso de uma peça intermediária, aqui chamada de suporte do corpo de prova (Figura 32).

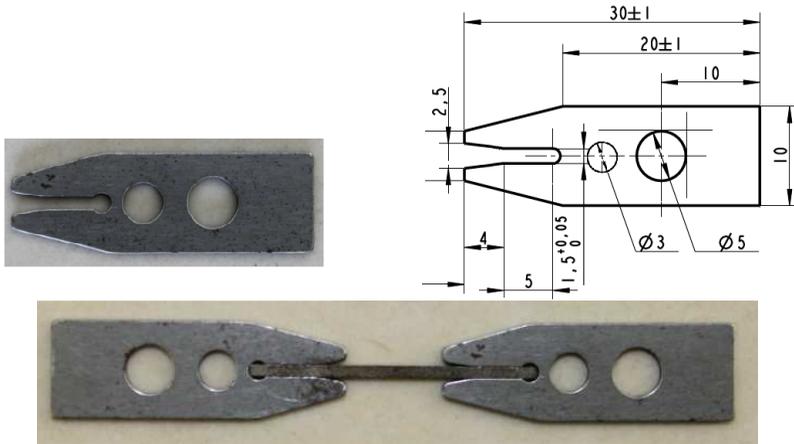


Figura 32 – Imagem do suporte do CP e da montagem suporte + CP (escala da montagem: 1,5:1) (Apêndice B)

Pode-se observar 3 furos circulares no suporte: o maior é utilizado na fixação do corpo de prova na EMIC; o central serve para fixação do *clip-gage* e o menor pelo qual passa o corpo de prova tem o objetivo de dar maior área de contato entre a cola utilizada e o CP, de modo a evitar o escorregamento entre suporte e peça ensaiada durante o teste.

Durante os testes iniciais para validação do procedimento de montagem houve um problema inesperado de escorregamento entre corpo e suporte de modo que a parte a ser ensaiada não se rompia durante o teste, e sim se soltava do suporte, isso porque o conjunto CP e base sofria escorregamento na região de interface.

Nos primeiros testes, foi usada a cola da marca “Plasteel”, um composto de aço com resinas reforçado com nylon, aplicada diretamente sobre o suporte e o corpo. Mesmo sendo para solda a frio, esse revestimento epóxi bi componente sozinho não foi suficiente para suportar o esforço cisalhante. Além desta, colas epóxi, cianoacrilato e outras concentrações de cola a base de aço foram testadas a diferentes concentrações.

O não escorregamento entre os corpos só foi obtido utilizando-se a cola cianoacrilato, comercialmente chamada de Super Bonder, porém com os quatro planos do CP em contato com a mesma. Para isso, pastilhas metálicas de área 10 x 10 x 1 mm foram coladas nos dois planos nos quais o suporte não mantinham contato (Figuras 33 e 34).

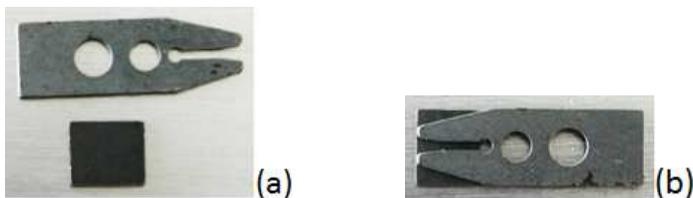


Figura 33 - (a) e (b): Fotos das pastilhas metálicas e posição em relação ao suporte do CP respectivamente.

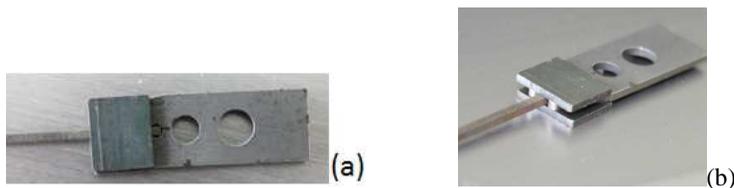


Figura 34 – c) e (d): Montagem do suporte + pastilhas + corpo de prova.

Tal processo exigiu um tempo não previsto inicialmente. Cerca de três meses foram necessários entre fabricação dos corpos para os testes com a cola e a descoberta do modo de colagem ideal.

O sucesso da fixação exige lixamento, limpeza e desengorduramento das superfícies da biela, do suporte e das pastilhas com que mantêm contato.

Sendo as amostras corpos delgados e frágeis, o processo de colagem deve ser realizado em uma superfície antiaderente, plana e de fácil extração dos corpos. Logo, a colagem foi feita sobre um pedaço de vidro plano, devidamente limpo e revestido com teflon entre o vidro a amostra para facilitar o desprendimento do CP do vidro e do teflon (tal qual foi feito o embutimento das bielas no acrílico rápido. Figura 23).

Instrumentação do corpo de prova (ideia inicial)

Devido à baixa amostragem, a fim de se obter os resultados mais próximos possível do real, além do sistema de aquisição de dados da máquina de ensaio de tração a qual fornece dados de força aplicada e deslocamento imposto, almejava-se instalar um mini *strain-gage* por CP conforme a figura abaixo.

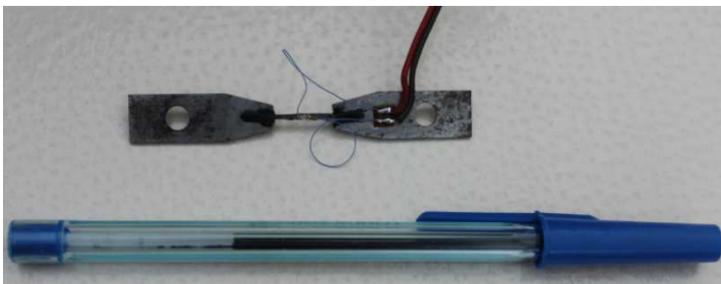


Figura 35 - Imagem do *strain-gage* fixado ao corpo de prova e o comparativo de tamanho com uma caneta.

Gauge pattern	Type	Gauge size		Backing		Resistance in Ω
		L	W	L	W	
 FBY-06 (X3)	Single-element	L : length		W : width (Unit : mm)		
	-005LE					
	FBY-06-11	0.6	0.8	5.3	1.0	120
	FLX-1-11					
	-17 -002LE	1	1.3	5.0	2.0	120
	-23					

Figura 36 - Especificação técnica do *clip-gage* fixado no corpo de prova.

O alto custo dos *strain-gages* (cerca de R\$120,00 em 2009) e a delicadeza de tal, fez com que o procedimento experimental fosse inviabilizado uma vez que os ensaios são de caráter destrutivo.

O uso de um *clip-gage* foi a alternativa de menor custo encontrada uma vez que o mesmo não é destruído ao término de cada ensaio, como citado na revisão bibliográfica.

Montagem do CP no *clip-gage*

A fixação do *clip-gage* no suporte do corpo de prova é feita com o auxílio de elásticos látex comuns tracionados de modo a causar um esforço compressivo das hastes do *clip-gage* contra o suporte do CP (vide figura 37)

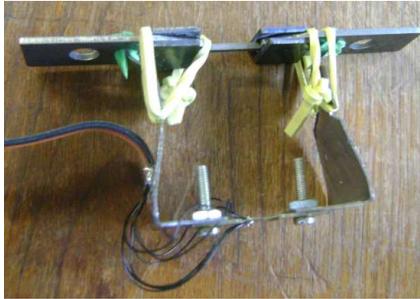


Figura 37 – Foto da montagem do corpo de prova + *clip-gage*

Preparação dos equipamentos envolvidos

A fim de filtrar ruídos externos os quais influenciam diretamente no resultados, prévio a qualquer prova experimental, exige-se calibração dos componentes.

Os *clipes-gage* utilizados foram calibrados no laboratório Grante pela mestre em eng. Elétrica e bolsista do laboratório Maria Regina Kunzler utilizando-se um calibrador de *clip gage* de uma faixa nominal de 25 mm, o qual tem uma resolução de 1.0 micrometro.

As células de cargas usadas no ensaio de tração acopladas à maquina de tração EMIC foram calibradas e certificadas pela Fundação CERTI (Fundação Centros de Referências em Tecnologias Inovadoras) Laboratório de Força, Pressão e Massa – Rede Brasileira de Calibração (Anexo A).



Figura 38 – Imagem do equipamento EMIC e da célula usada para os testes.

O ensaio

Durante a fase de desenvolvimento da metodologia de trabalho, almejava-se instrumentar cada corpo de prova com *strain-gages* de menos de 1mm de largura, conforme citado acima.

Como dito anteriormente, os *clip-gages* são também transdutores elétricos assim como os *strain-gages* e específicos para medir deslocamentos lineares de pequeno curso. Mesmo o ensaio sendo destrutivo, os *clip-gages* não são, o que reduz o tempo de preparação do corpo de prova e o custo dos testes. Além disso, pode-se usar um extensômetro maior, não tão delicados.

Antes de chegar à configuração atual do *clip-gage*, vários outros com diferentes materiais e dimensões foram testados. Isso porque além do escorregamento entre CP e suporte, as primeiras provas realizadas também apresentaram escorregamento do *clip-gage*.

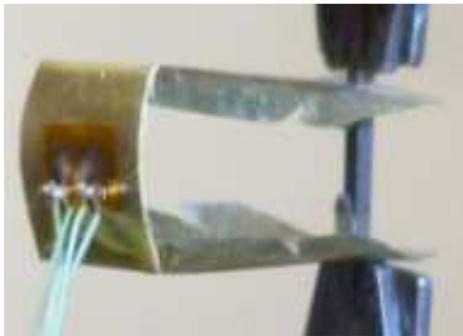


Figura 39– Um dos *clip-gages* testados inicialmente e que falhou pois suas hastes paralelas eram flexíveis e as deformações não se concentravam unicamente na região dos *strain-gages* (material: aço mola).

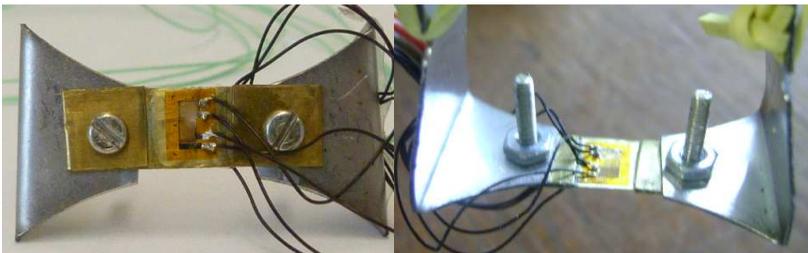


Figura 40 – *Clip-gage* final usado nos ensaios de tração

As seguintes figuras são uma representação esquemática da montagem *clip-gage* e corpo de prova mais base, acoplados ao equipamento de tração.

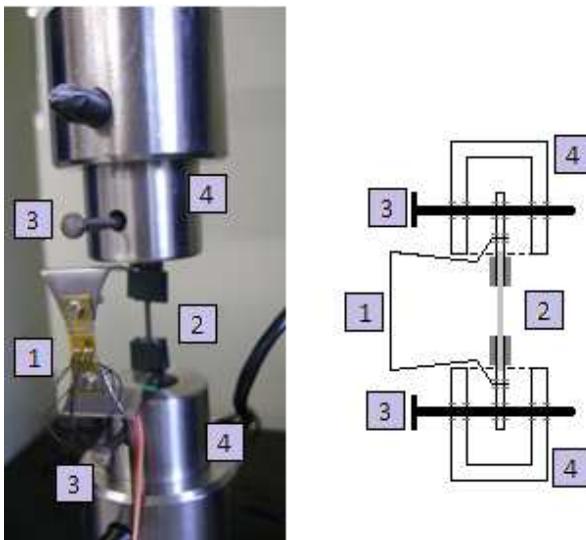


Figura 41 – Foto da montagem corpo de prova + *clip-gage* na EMIC e uma representação esquemática da montagem. (1) *Clip-gage*, (2) corpo de prova + suporte, (3) parafusos de fixação do CP na EMIC, (4) cilindro oco que suporta o CP durante o ensaio (componente da EMIC)

A máquina usada para o ensaio de tração é conectada a um computador e ao sistema de aquisição de sinais, o Spider.

O sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho foi o Spider 8, um sistema eletrônico multicanal digital universal, que mede sinais elétricos e variáveis mecânicas como: resistência, força, pressão, aceleração, temperatura e descolamento linear. Para os experimentos aqui descritos, os dados coletados foram deslocamento linear e força.



Figura 42 – Imagem ilustrativa do sistema Spider8-30 600Hz utilizado

Os dados por ele obtidos são armazenados em bancos de dados do mesmo computador conectado à EMIC.

O corpo de provas a ser ensaiado é posicionado no equipamento de tração de forma a ter certo grau de liberdade rotacional no eixo Z em um sistema de coordenadas cilíndricas. Depois de firmada sua posição, configura-se esta como posição 0,0,0.

A EMIC impõe um deslocamento de 1mm/s e fornece como sinal de saída a força imposta para tal deslocamento. Os dados são coletados simultaneamente pelo computador conectado ao equipamento e, através do software comercial da EMIC, gera-se como resultante uma planilha de relação força x deslocamento.

Em paralelo, o outro sistema ligado ao *clip-gage*, o Spider, recebe como sinal de entrada o sinal elétrico fruto da transformação da deformação em este tipo de sinal feito pelo extensômetro elétrico de resistência. Com tal sinal de saída, é gerada a planilha de dados tempo x força x deslocamento.

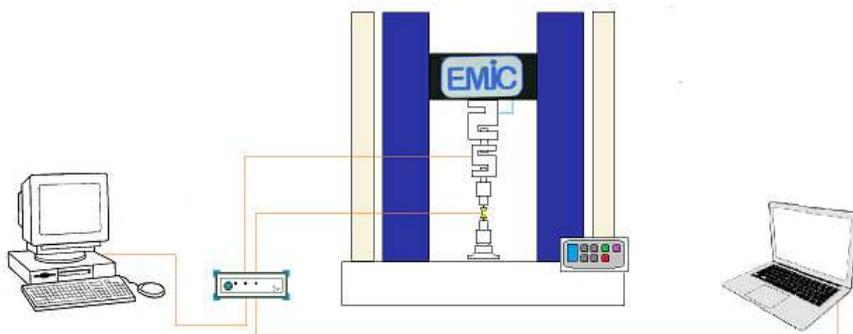


Figura 43 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados para a análise experimental.

4.2.2 Análise numérica

Para o seguinte trabalho a análise numérica serve como modo de validação da metodologia experimental. Lembrando que a motivação da dissertação foi o fato de que o resultado da análise numérica da biela (simulação no Ansys) utilizando-se como dados de entrada de propriedades tabelados não condiziam com os resultados experimentais obtidos nos testes físicos feitos com a mesma biela.

Para a avaliação das tensões e limites mecânicos da biela em operação via simulação numérica há dois modos de configuração das propriedades mecânicas:

- 16 áreas homogêneas cada qual com sua propriedade (resultados da análise experimental)
- Alimentação do software com propriedades de um material ortotrópico.

A fim de replicar com maior fidelidade os experimentos, optou-se pelo primeiro caso, de se trabalhar com 16 áreas homogêneas.

Usualmente se importa o objeto ou a montagem a ser analisada direto para o Ansys já pronto para configuração das propriedades. O Ansys Workbench possui um recurso chamado *DesignModeler* ANSYS que suporta a definição de superfícies ou correções em um modelo de CAD e o salva para ser DesignModeler (DM) impresso em uma superfície sem ter que modificar o modelo de CAD em si. (Tutorial, 2006)

Neste caso, através do recurso DM a biela tem sua alma segmentada em 16 áreas representativas às partes ensaiadas experimentalmente, de modo que para cada nova parte uma característica mecânica foi atribuída em base aos testes experimentais.

Devido aos resultados obtidos com os experimentos a análise numérica não foi realizada no presente trabalho.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados a seguir apresentados contêm apenas os dados obtidos pelo equipamento de ensaio, a EMIC. Isso porque os gráficos da EMIC quando confrontados com os obtidos via Spider, com informações do *clip-gage* são bastante discrepantes.

As curvas do *clip-gage* apontam que provavelmente houve escorregamento entre o corpo de prova e o *clip-gage* ou até mesmo falha construtiva ou dano após os primeiros ensaios.

As três bielas ensaiadas receberam nomenclatura A, B e C e os CPs foram nomeados seguindo a seguinte figura:

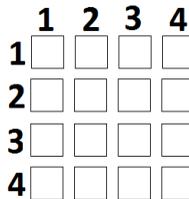


Figura 44 - Vista frontal dos CPs e suas respectivas posições na biela.

Os resultados foram avaliados de três diferentes maneiras:

- A mesma posição (ex: 11) das 3 bielas,
- Linhas 1, 2, 3 e 4 das 3 bielas,
- Todas as curvas sobrepostas em um mesmo gráfico.

Resultado do comparativo das mesmas posições nas 3 bielas:

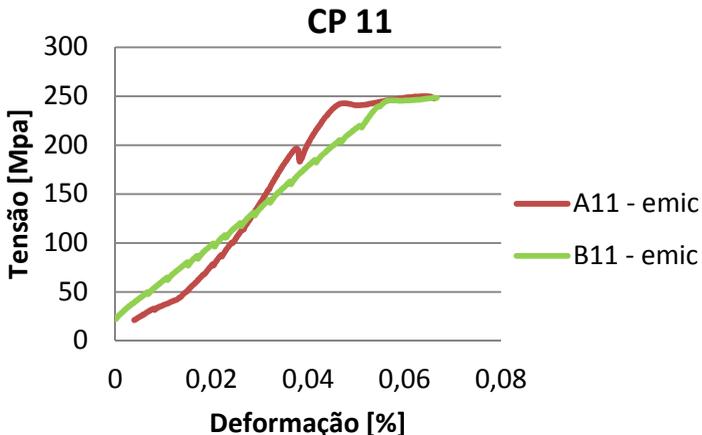


Figura 45 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 11.

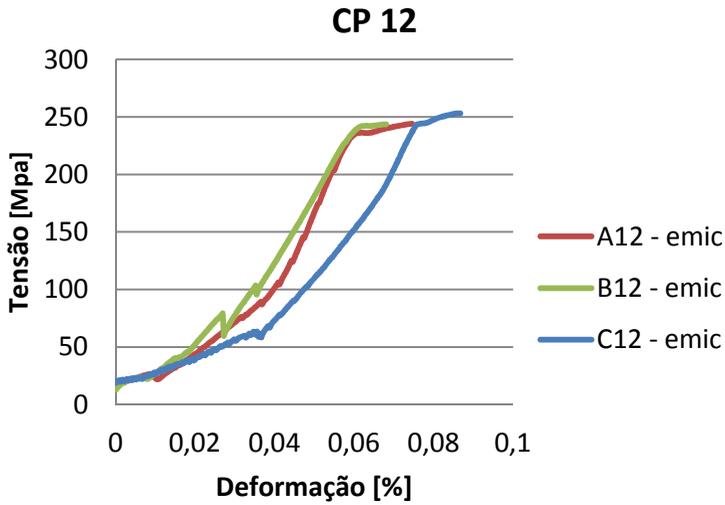


Figura 46 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 12.

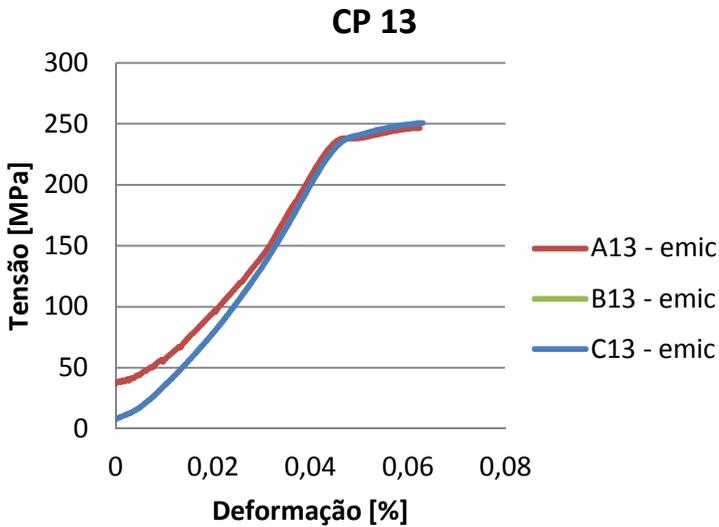


Figura 47 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 13

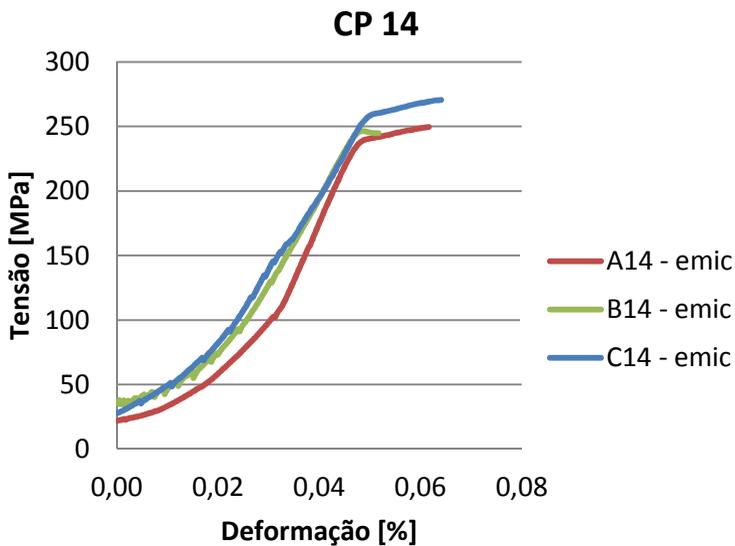


Figura 48 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 14

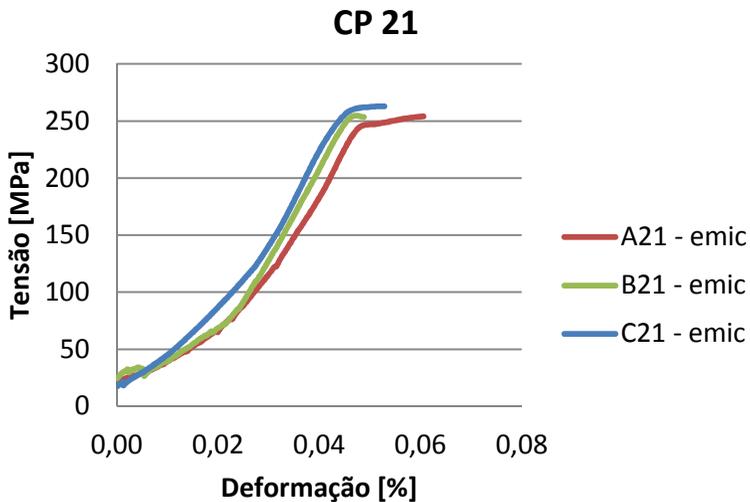


Figura 49 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 21.

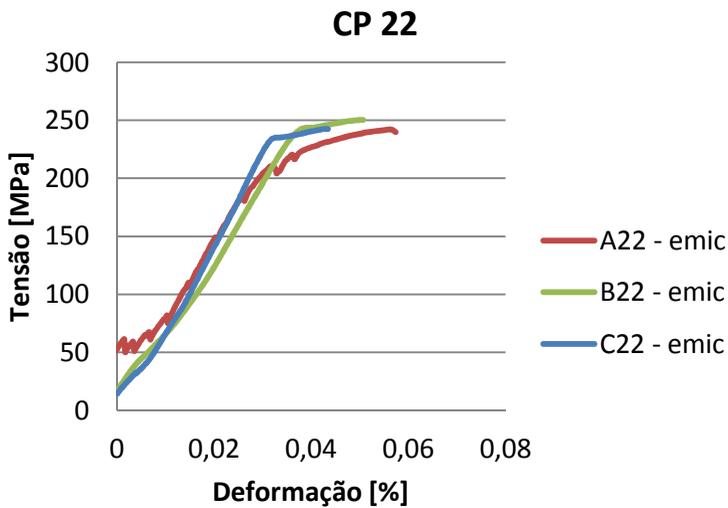


Figura 50 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 22.

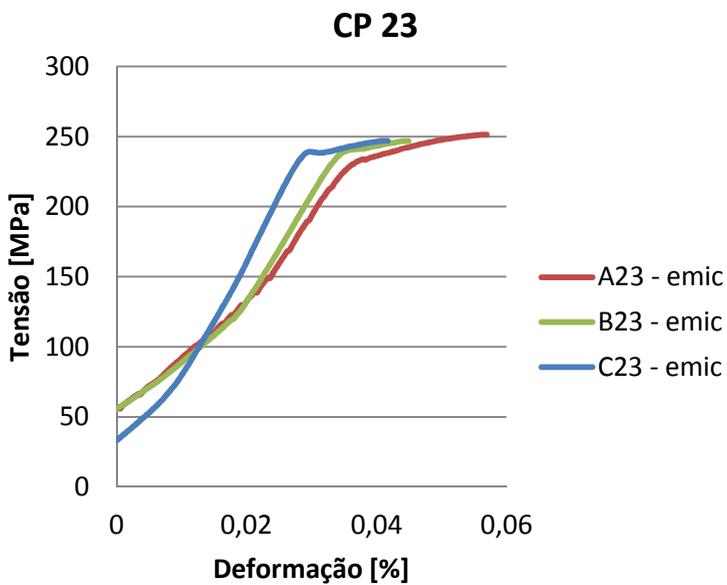


Figura 51 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 23.

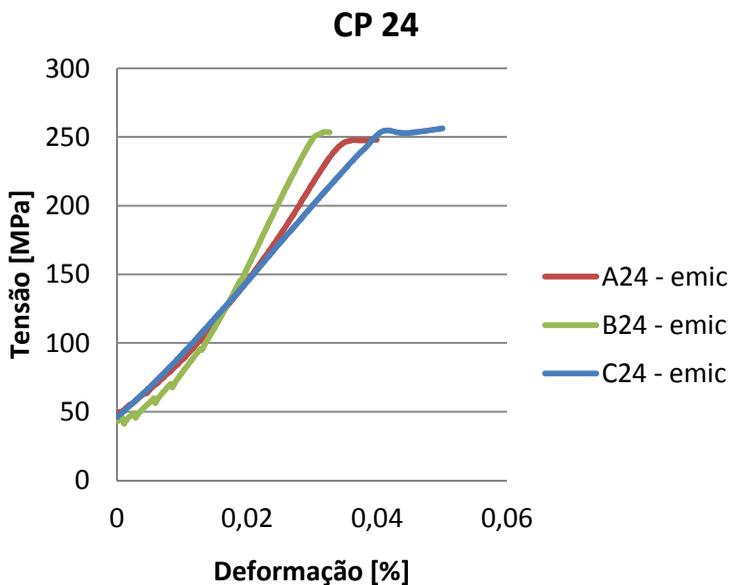


Figura 52 - Gráfico Tensão-Deformação referente ao CP posição 24.

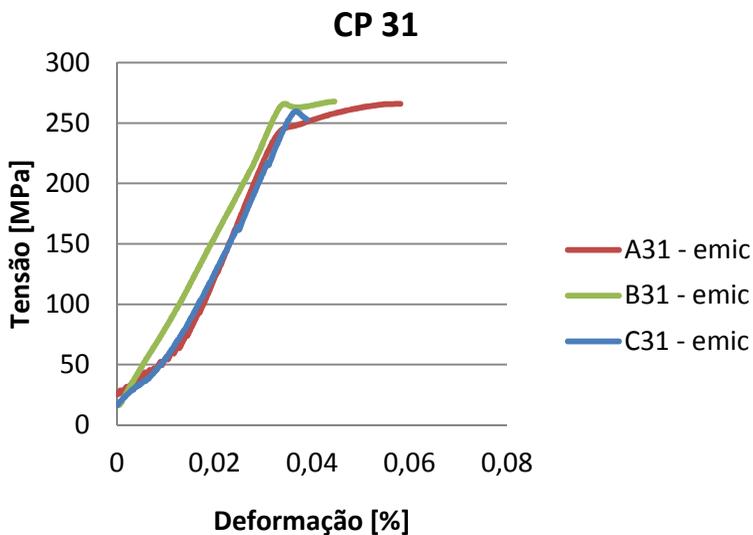


Figura 53 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 31.

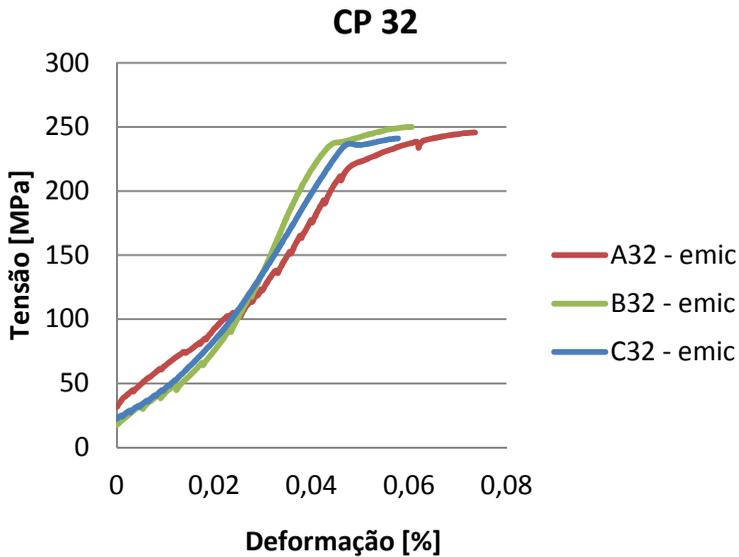


Figura 54 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 32.

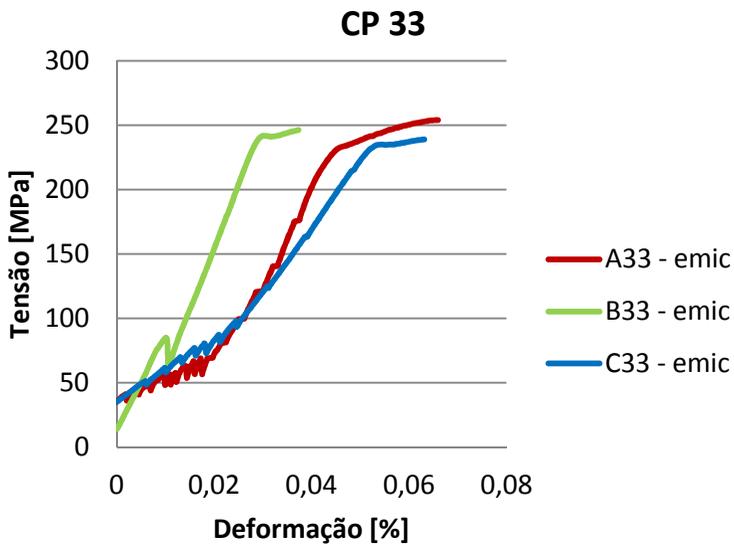


Figura 55 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 33.

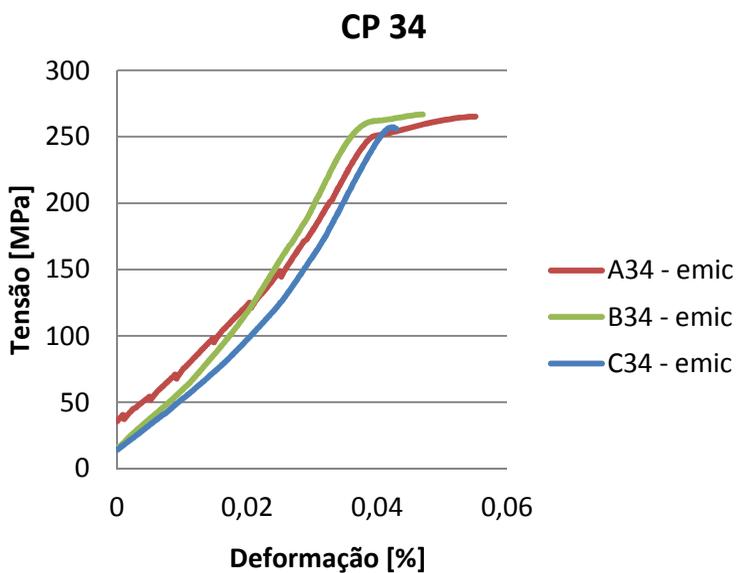


Figura 56 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 34

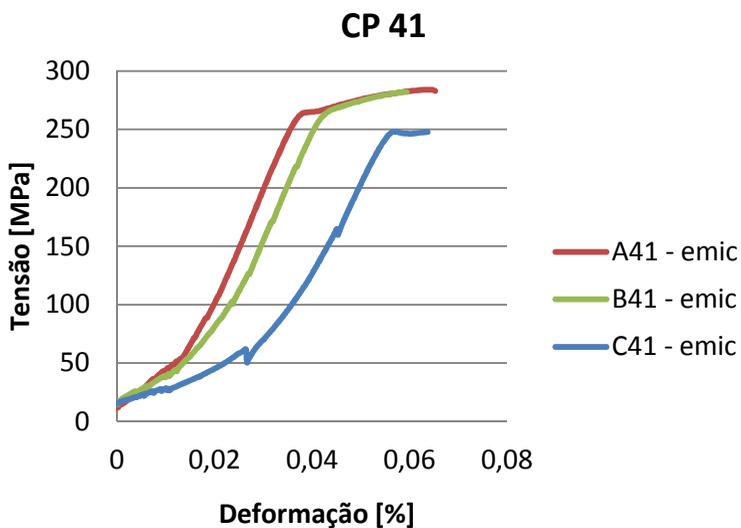


Figura 57 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 41.

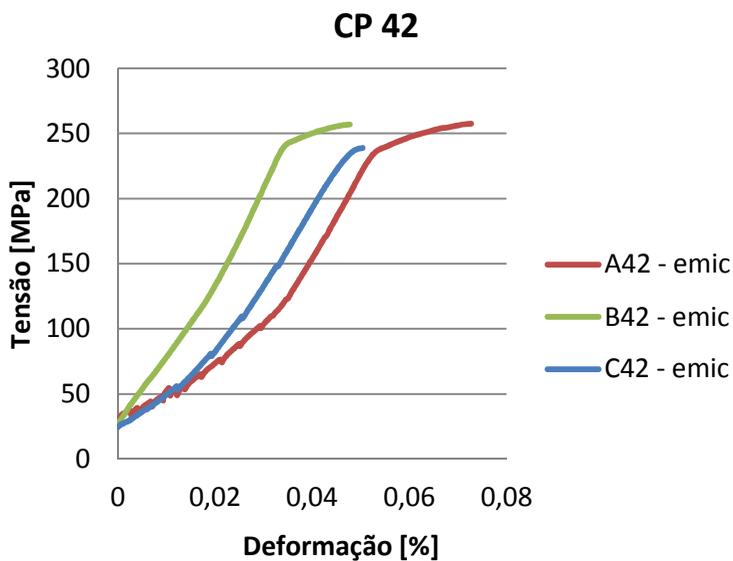


Figura 58 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 42.

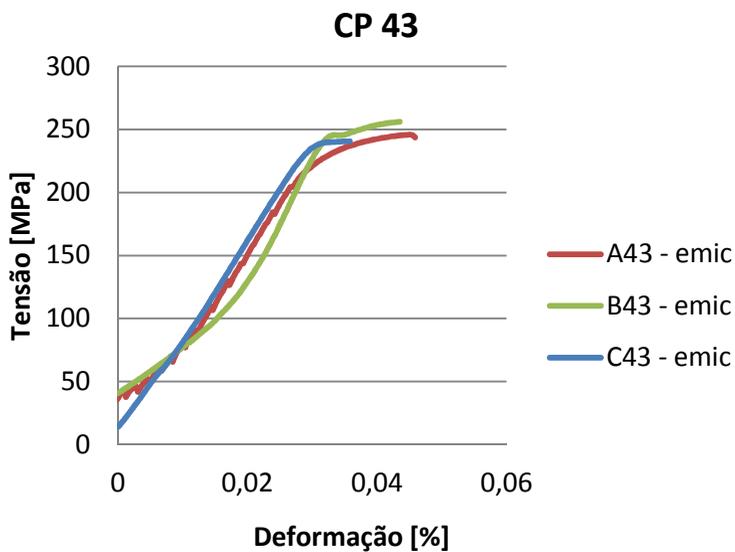


Figura 59 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 43.

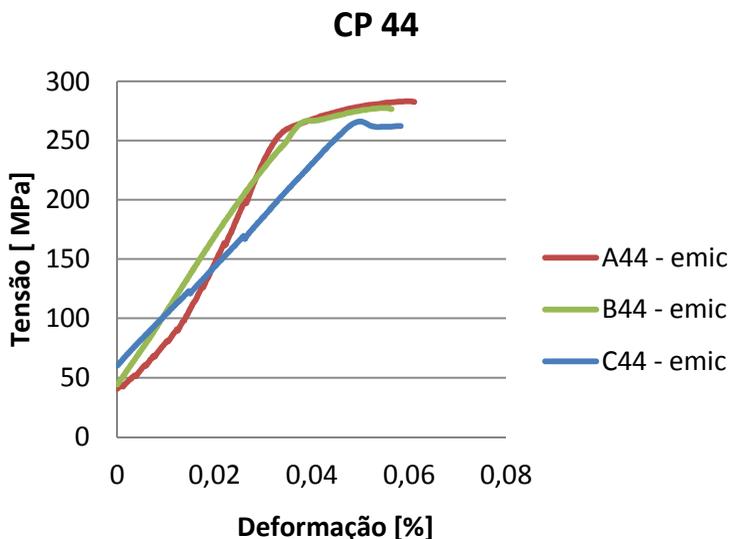


Figura 60 - Gráficos Tensão-Deformação referente aos CPs posição 44.

Avaliando individualmente cada gráfico observa-se que, quando comparada à mesma região em bielas diferentes, as máximas tensões de escoamento são próximas, porém tanto as deformações quanto às inclinações da curva em poucos casos são coincidentes e em nenhum caso as 3 bielas tiveram as curvas similares e próximas de se sobreporem.

Outra maneira de comparação e avaliação a fim de se encontrar uma consistência e repetitividade dos resultados é comparando as linhas 1, 2, 3 e 4 das três bielas, baseado no sentido de compactação da peça e de que as propriedades nestes planos deveriam ser similares entre si.

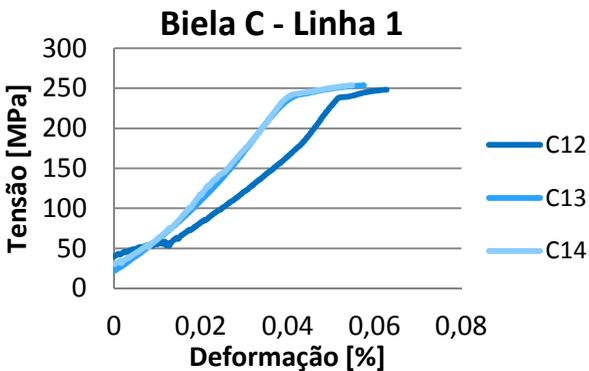
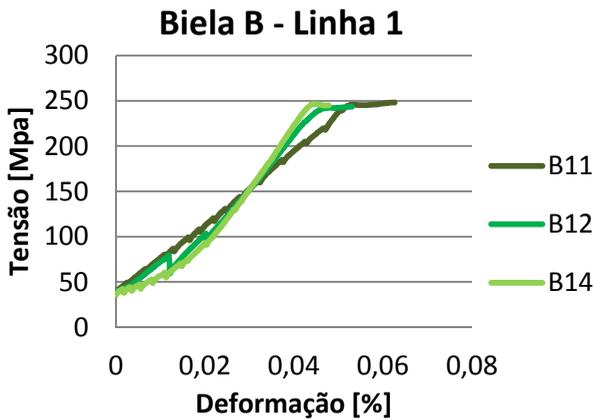
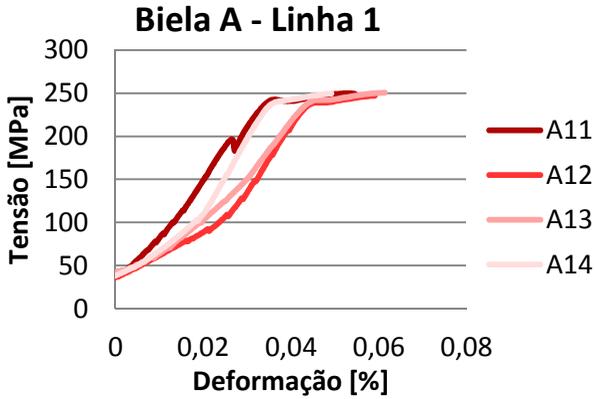


Figura 61, 62 e 63 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 1 das bielas A, B e C respectivamente.

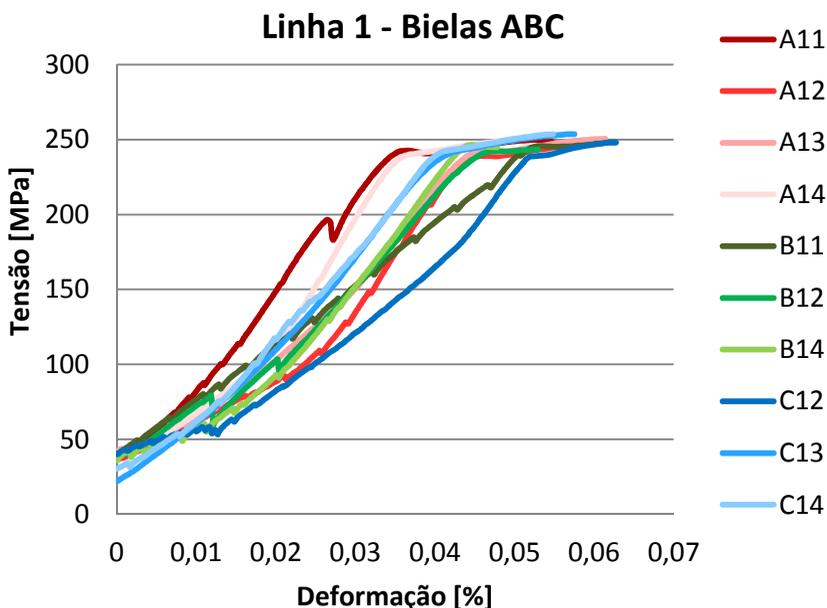


Figura 64 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 1.

Analisando o gráfico 66 acima, é possível constatar que as curvas A12, A13 e B12 são coincidentes em $\sigma_{\text{escoamento}}$ e no valor de deformação.

Na região elástica, as curvas e suas inclinações são parcialmente coincidentes entre B12, B14 e A13 e todas estas apresentam um abaulamento nesta mesma região.

As outras curvas têm ao menos uma curva próxima quando comparadas com curvas da mesma biela.

Todas as 10 curvas têm limites de escoamento máximo próximos a 240 MPa.

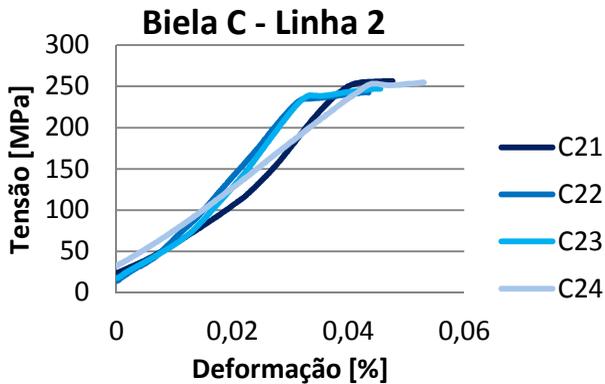
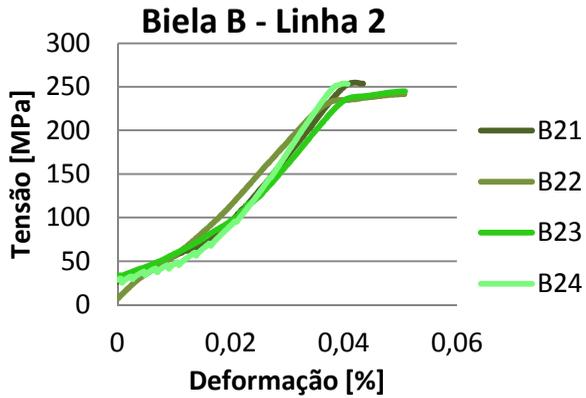
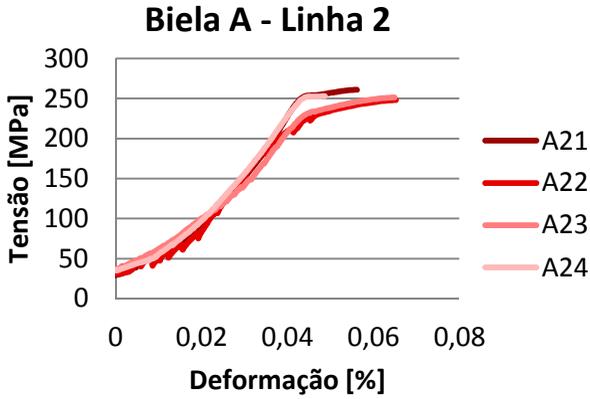


Figura 65, 66 e 67 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 2 das bielas A, B e C respectivamente.

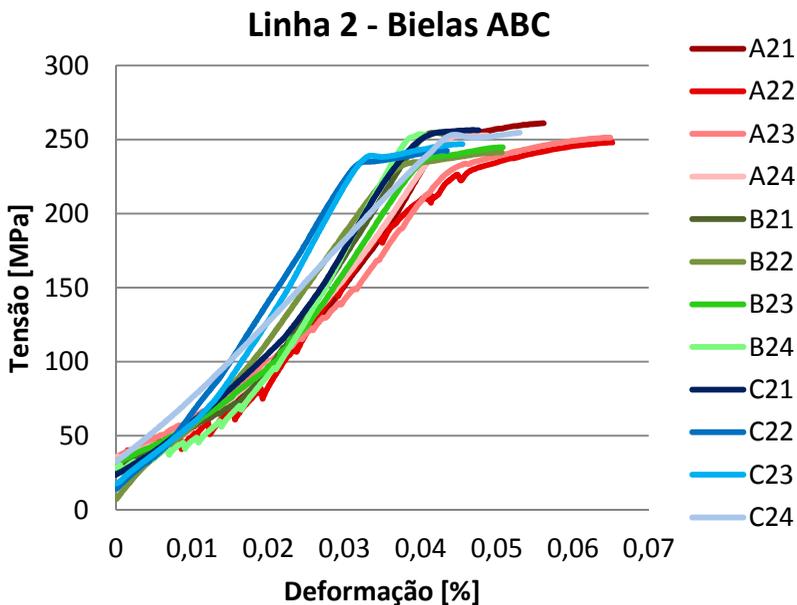


Figura 68 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A,B e C linha 2

Observando as figuras 65, 66 e 67 nota-se que para as três bielas as posições 22 e 23 são coincidentes entre si tanto na inclinação das retas quanto na tensão de escoamento e deformação. O mesmo se observa para as posições 21 e 24.

Os CPs A21, A24, B21, B24, C21 e C24 têm tensões de escoamento próximas ao valor de 255 MPa, enquanto que os corpos A22, A23, B22, B23, C22 e C23 têm tensões de escoamento também similares entre si e próximas a 235MPa.

Focando na inclinação da reta depois do abaulamento as peças A21, A24, B21, B24 e C21 têm inclinações similares porém deslocadas em relação ao eixo X.

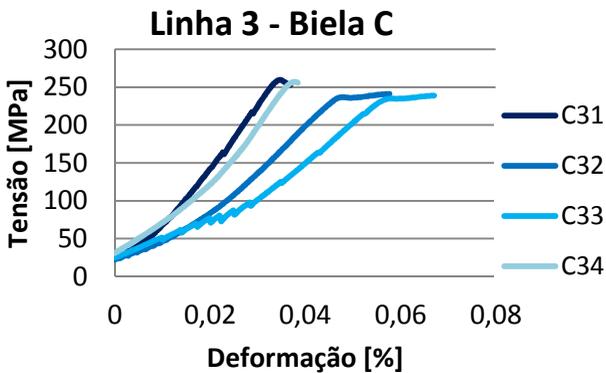
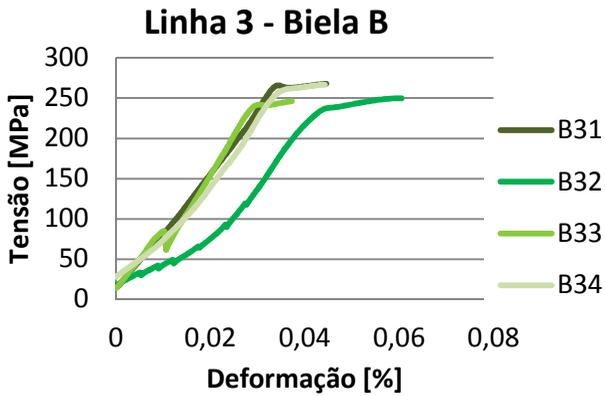
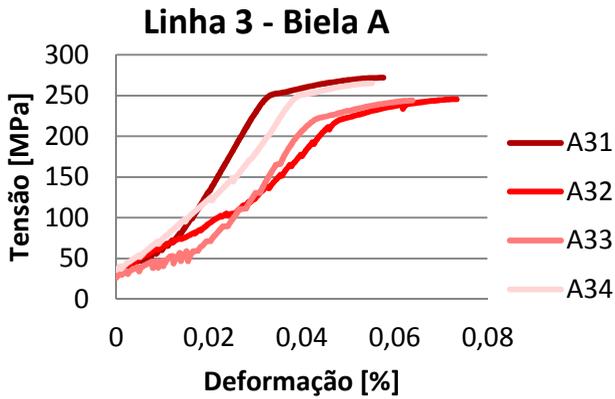


Figura 69, 70 e 71 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 3 das bielas A, B e C respectivamente.

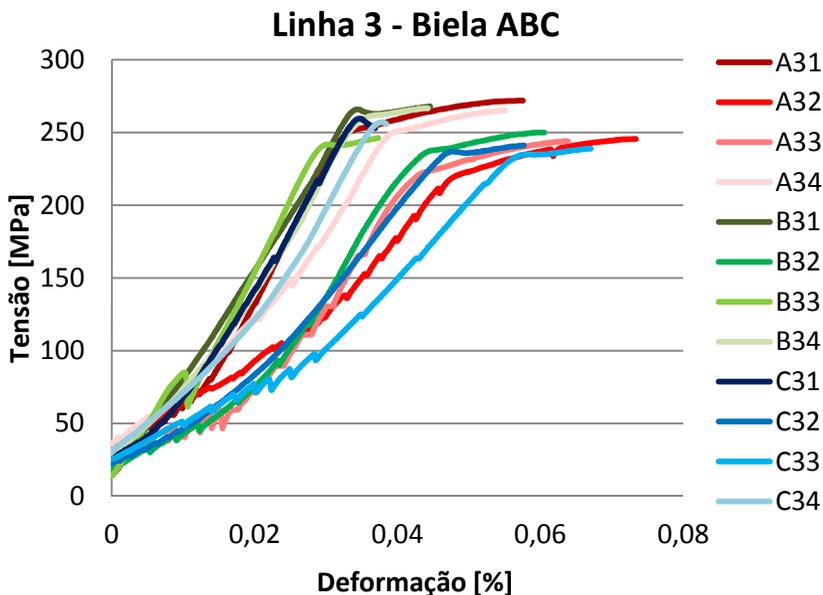


Figura 72 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 3.

Assim como na linha 2, na terceira se pode notar um comportamento similar onde nas três bielas as posições 32 e 33 são coincidentes quanto à tensão de escoamento e deformação tal qual ocorre com as posições 31 e 34.

Fazendo a sobreposição de todas as curvas (Figura 72) é possível identificar 2 zonas: uma formada pelos CPs A31, A34, B31, B34, C31 e C34 e outra pelos CPs A32, A33, B32, C32 e C33. Exceto a curva B33 que se encontra fora desse grupo com uma inclinação similar aos corpos de prova das extremidades.

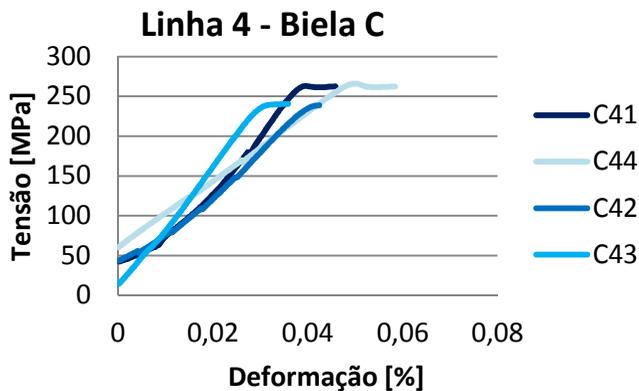
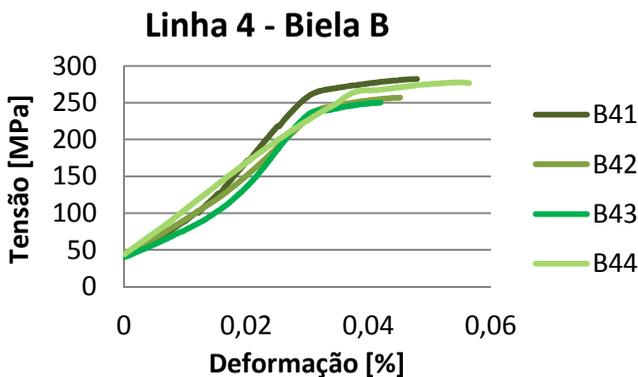
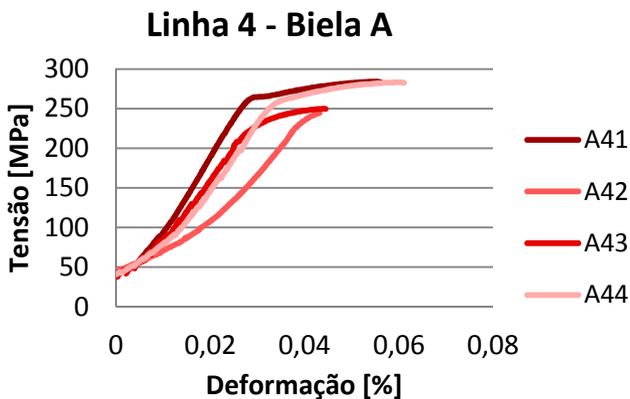


Figura 73, 74 e 75 - Gráficos Tensão-Deformação referentes à linha 3 das bielas A, B e C respectivamente.

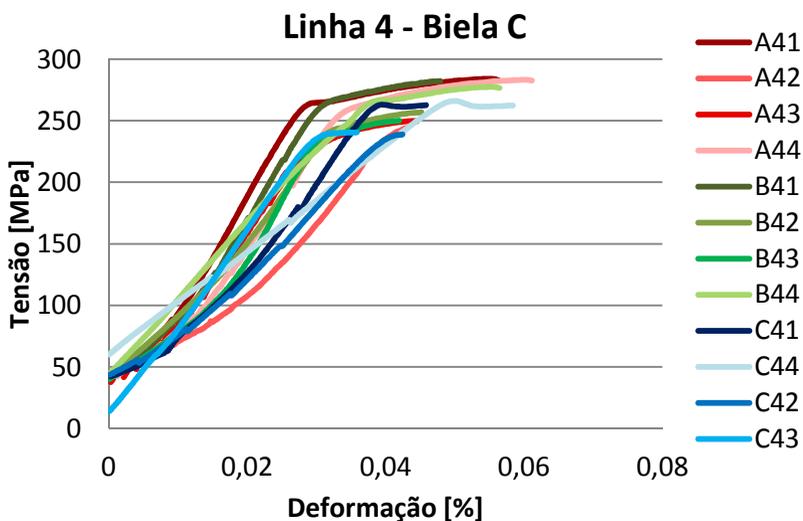


Figura 76 - Gráfico Tensão-Deformação das bielas A, B e C linha 4.

Observando os gráficos 73, 74 e 75 vê-se um comportamento similar ao visualizado nas linhas 2 e 3. Todavia os corpos periféricos (A41, A44, B41, B44, C41 e C44) apresentam tensões de escoamento maiores do que quando comparado às linhas 2 e 3, na faixa de 270MPa. O mesmo fenômeno também é observado nos CPs centrais, porém as tensões são similares às das linhas 2 e 3 (aproximadamente 240MPa).

Os resultados acima apresentados, as diferenças de tensões máximas dentro de uma mesma linha e o comportamento repetitivo nas linhas 2, 3 e 4 podem ser justificados em base à forma de compactação e sinterização da biela.

Voltando à figura 20 e considerando a figura abaixo:

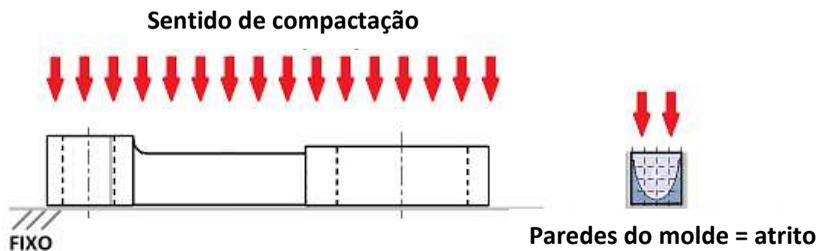


Figura 77 - Sentido de compactação e distribuição da dureza ao longo da alma em função do atrito dos grãos com as paredes do molde.

A figura 77 esboça a distribuição da dureza ao longo da alma no sentido de compactação considerando um comportamento similar ao do concreto quando compactado. A região escura apresenta maior dureza quando comparada à região mais clara. Tal fenômeno pode ser uma justificativa para o comportamento das peças ensaiadas e para os resultados de tensões obtidos.

Referente às propriedades mecânicas do material da biela, a fabricante considera esses valores em base à tabela de propriedade da MPIF. Para tal material, os valores de tensões sugeridos pelo fabricante da biela são inferiores aos encontrados na avaliação por zona (CPs individualmente). No caso da tensão de escoamento, os valores indicados pela norma apresenta uma divergência em relação aos valores encontrados experimentalmente que variam entre 20 - 42% para menos; isto é, a biela teoricamente está superdimensionada.

Por questões de sigilo industrial as propriedades do material não podem ser documentadas na dissertação.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que a metodologia de ensaio proposta no presente trabalho é válida, com base na comparação das tensões encontradas experimentalmente através da aplicação do método *versus* os valores de tensões indicados pelo fabricante. Os resultados obtidos confirmam que as tensões suportadas pelo componente até o momento da falha é significativamente superior ao indicado pelo fabricante da biela, justificando assim a divergência de resultados encontrados pela Embraco quando se confrontava a análise numérica da biela *versus* o seu comportamento em testes de falha forçada (bielas superestimadas).

Também observou-se que os valores de tensões encontrados condizem com o previsto pelo método de fabricação de componentes sinterizados. Desta maneira, a metodologia proposta associada à avaliação do sentido de compactação a verde do componente pode levar à otimização das peças.

Este trabalho de dissertação almejava obter curvas com as características conhecidas de Tensão-Deformação para usar tais dados na continuidade do trabalho. Porém os resultados encontrados não apresentaram uma repetitividade de maneira que permitissem usá-los como dados de entrada para a análise numérica.

Alguns pontos de observação foram levantados como possíveis fatores de interferência nos resultados:

- Baixa resolução do equipamento de ensaio para o tipo de experimento realizado.
- Folga entre a fixação do conjunto 'CP+suporte' e o cilindro de acoplamento da EMIC.
- A área de secção de $1,44\text{mm}^2$ talvez não seja suficiente para se obter uma área com propriedades constantes.
- Baixa amostragem. Devido à complexidade da fabricação dos corpos de prova, a amostragem de apenas 3 CPs não foi suficiente para tirar uma curva de tendência dos ensaios confiável. Parte das bielas que deveriam ser ensaiadas foram consumidas durante os testes de determinação do meio de fixação do CP, diminuindo as amostras disponíveis para a amostragem.

Além dos fatores citados acima os seguintes fatores também contribuíram:

- Proposta inovadora. Há poucas informações sobre ensaios de "*small specimens*" no meio científico, na literatura as informações se referem aos ensaios com corpos de prova padrão.

- Carência de equipamentos para ensaios de maior sensibilidade.

O primeiro método experimental, análise ótica, usado para determinação da porosidade das diferentes regiões da alma da biela e posteriormente descartado provavelmente seja válido, considerando que possivelmente para a medição correta do percentual poroso se deveria levar em consideração o percentual de ferrox mais o percentual de poros.

O estudo proposto poderá ser útil não somente para projeto de biela, mas também para componentes estruturais cuja forma de fabricação e solicitação mecânica se assemelhem a tal peça analisada.

Desta forma, esse estudo tornar-se-á um potencial benefício para a Embraco, uma vez que seus componentes sinterizados assumem condições vitais ao funcionamento do compressor e há todo um núcleo tecnológico envolvido e interessado na obtenção e conhecimento destas informações. Além disso, proporcionará avanços nas pesquisas de estruturas sinterizadas, tanto na Embraco, quanto na Universidade Federal de Santa Catarina.

7. CONTINUIDADE DO TRABALHO

Ainda na área de sinterizados, há uma carência quanto a mecanismos de dano e os critérios de falha ideais para tais componentes.

As características de tensões de escoamento encontradas neste trabalho e sua correlação com o sentido de compactação pode servir de base para projetos de otimização da biela como proposta de redução de custo sem mudanças bruscas de projeto.

A repetição dos testes em um equipamento apropriado e com maior amostragem provavelmente levarão a resultados satisfatórios a ponto de serem adequados para uma análise numérica conforme aqui descrito e que estava previsto no trabalho aqui relatado.

A priori, ensaios dinâmicos também eram previstos; todavia devido a alguns imprevistos encontrados ao longo dos estudos iniciais tais testes foram inviabilizados.

Após esta etapa há a possibilidade da necessidade de “filtrar” os resultados experimentais através de levantamentos probabilísticos usando a curva de Weibull.

Referente a materiais sinterizados porosos, existem alguns critérios de falha pouco abordados no meio científico e que foram pesquisados durante os estudos deste mestrado, como o critério de Gurson, o qual pode servir de base para novos estudos de modelamento numérico.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, T. P., et al. 2006.** *Análise da Capacidade de Deformação do Concreto: Módulo de Young X Módulo de Deformação*. Foz do Iguaçu, Brasil : s.n., 2006, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.
- Beiss, P. and Dalgic, M. 2001.** *Structure property relationships in porous sintered steels*. s.l. : Material Chemistry and Physics, 2001. pp. 37-42. 67(1).
- Bezmyannyi, Yu. G. and Kushchevskii, A. E. 2003.** *Experience of Improving Standards and Methods for Studying the Properties of Metal Powders and Sintered Articles*. Kiev : Institute for problems of Materials Science, 2003. Nos, 1-2(429), pp. 106-113.
- Callister, W.D. 2002.** Estruturas e Propriedades das Cerâmicas. [book auth.] Soares S. M. S. and Miranda P. E. V. (eds). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5ed. s.l. : LTC, 2002. chapter 13.
- Condon, J. B. 2006.** *Surface area and porosity determinations by physisorption : measurements and theory*. 1st. Harriman : British Library Cataloguing in Publication Data, 2006.
- Czichos, H., Saito, T. and Smith, L. 2006.** *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Berlin : Springer, 2006. pp. 303-304. ISBN 978-3-540-30300-8.
- da Rosa, E. 2002.** *Análise de Resistência Mecânica (mecânica da fratura e fadiga) de peças e componentes estruturais (Apostila)*. Florianópolis : UFSC, 2002.
- DeGarmo, E.P. , et. al. 1997.** *Material and Processes in Manufacturing*. Upper Saddle River. 8, 1997.
- Diamond, S. 2000.** Mercury porosity - an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement Concrete* . Res. 30, 1517-1525, 2000.
- Domeneghetti, Gustavo. 2011.** *A expressão da incerteza de medição em ensaios mecânicos: ISO Gum e Monte Carlo aplicados no ensaio de tração*. Joinville : Sociedade Educacional de Santa Catarina - Instituto Superior Tupy, 2011.
- Dourado, B. T. 2008.** *Avaliação do Processo de Produção - estudo dimensional de peça sinterizada*. São Paulo : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares associada à USP, 2008.
- Esper, F.J. and Sonsino, C. M. 1994.** *Fatigue Design for PM Components*. s.l. : European Powder Metallurgy Association (EPMA), 1994.

- Esper, F.J., Kreißig, J. and JMichelmann, H. 1974.** *Heavy Duty Sintered Parts of Complicated Shape*. s.l. : Powd. Met. Intern., 1974. pp. 124-127. 6.
- Garcia, Vitor e Swart, Jacobus Willobroordus. 2002.** *Circuito de Interface para Sensor de Pressão Piezoresistivo. X Congresso Interno de Iniciação Científica*. 2002.
- German, R. M. 1984.** *Powder Metallurgy Science. N.J. Metal Powder Industries Federation*. 1st Ed., 1984.
- Gessinger, G. H., et al. 1971.** *Pore Geomertry and MEchanical Properties of Sintered Iron and Steel*. s.l. : Powd. Metallurgy 14, 289-310, 1971.
- Hibbeler, R. C. 2004.** *Resistência dos Materiais*. São Paulo : Prentice Hall, 2004.
- Holt, J.M. 2000.** *Uniaxial Tension Testing*. . Ohio : American Society for Material ASM Handbook, vol 08, 2000.
- Klein, A. N. 2004.** *Materiais sinterizados: técnica, produtos e aplicações*. Florianopolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- Malvern, L. E. 1969.** *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. 1969.
- Material Standards for PM Structural Parts: MPIF Standard 35 - PM Structural Parts. 2007.* 2007.
- 2007.** *Materials Standards for PM Structural Parts. Metal Powder Industries Federation (MPIF) Standard 35*. 2007.
- Moraes, A. M. C., Moreira, A. C. and Appoloni, C. R. 2007.** *Determinação da porosidade da cortiça através da metodologia de transmissão de raios gama e análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007*. 2007.
- Neves, M.D.M. 2005.** *Sinterização de misturas de pós de liga de ferro para aplicações automotivas*. s.l. : Tese de Doutorado – IPEN/USP, 2005.
- Norton, R. L. 2004.** *Projeto de Máquinas - uma abordagem integrada*. s.l. : Ed. Bookman, 2004.
- Palma, E. S. 1997.** *Influence of Porosity on Fatigue Cumulative Damage of Sintered Iron*. 618 : s.n., 1997. Vol. 6(5).
- Phillips, R. A., E., King J. and R., Moon J. 2000.** *Fracture toughness of some high density PM steels*. s.l. : Powder Metallurgy, 2000. Vol. 43. 1.

- Ribeiro, F. 2007.** 4º DPETRO. *Análise de Resultados Experimentais de Ensaios em Corpos de Prova de Fadiga em Materiais para dutos API 5L X60.* Campinas : s.n., 21-24 de October de 2007.
- Rice, R. W. 1977.** *Treatise on Materials Science and Technology.* [ed.] R. K. MacCrone. New York : Academic Press, 1977. 199-281.
- Shmelev, L. S. 2002.** *Current PM literature for engineers and users.* s.l. : Powder Metallurgy Journal, 2002. pp. 367-373(7). Vol. 45.
- SILVA, ARTHUR e al., et.** O uso do controle estático de processos para melhorar o desempenho das empresas de saneamento.
- Smith, K. N., Watson, P. and H., Topper T. 1970.** *A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals.* s.l. : Journal of Materials, JMLSA, 1970. pp.767-778. Vol. 5 No.4.
- Sokolov, M. e Landes, J.D. 2002.** *Small Specimen Test Techniques: Fourth Volume.* s.l. : ASTM STP1418, 2002.
- Steuer, W. e Rübenach, F. 1991.** PM – Bauteile für Fahrradnaben. *Pow. Met. Intern.* 23, 392, 1991.
- Teixeira, R. L. P. 2009.** *Uso de Polímeros na Biocompatibilização de Micro Sensor de Pressão Intravascular.* Belo Horizonte : Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- Thümmeler, F. E. and Oberacker, R. 1993.** *An Introduction to Powder Metallurgy.* London : The Institute of Materials, 1993.
- Tutorial, ANSYS. 2006.** *Ansys 10.0 Workbench Tutorial.* s.l. : ANSYS, Inc, 2006.
- Verdu, C., et al. 2001.** Fatigue crack growth characterization and simulation of a porous steel. *Materials Science and Engineering.* 2001.
- www.mahle.com.br.** Mahle - Driven by Performance. [Online]
- Yoshimura, H.N., et al. 2005.** Effect of porosity on mechanical properties of high purity alumina. *Cerâmica.* 2005, Vol. 51, pp. 239-251.

ANEXO A



Laboratório de
FORÇA, PRESSÃO E MASSA
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 10/03/11

Data da Emissão: 16/03/11

n. 1012/11

Página: 1 de 4

1. CONTRATANTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Conjunto Universitário, s/n - FLORIANÓPOLIS - SC

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. DINAMÔMETRO ELETRÔNICO CALIBRADO

3.1 Transdutor de Força

tipo de Carregamento: Compressão e Tração

n. Série (fabricante): 12991728

n. identificação (solicitante): FEESC 016162

Intervalo de Indicação: 0 a 500 N

3.2 Dispositivo Mostrador

n. Série (fabricante):

n. identificação (solicitante):

Resolução: 0,0001 mV/V até 0,9999 mV/V

0,001 mV/V a partir de 1 mV/V

Fator de Ajuste: Não aplicável

4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

4.1. Dinamômetro Elettrônico

Nº Registro (CERTI): RC 3034/RC 2014/C

U: 0,01 N

Rastreabilidade Metrológica: Certificado de Calibração CETEC-MG 122640, de 07/01/10, válido até 01/12.

U: 0,4 N

5. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

PC-155

O dinamômetro eletrônico calibrado foi montado em série com o dinamômetro eletrônico do SMP, simulando a condição normal de trabalho do mesmo, sendo os valores de força pré-estabelecidos referenciados pelo SMC, realizando-se as leituras no indicador do SM padrão.

Este certificado atesta os resultados de medição obtidos pelo Equipamento, que atende à competência do laboratório e conformidade com rastreabilidade e padrões nacionais de medida. A Equipamento é registrado no Acordo de Reconhecimento Mútuo de SMC, Interinstitucional e Intersetorial de Calibração, e do Acordo de Reconhecimento Mútuo com o ILM - Instituto Brasileiro de Metrologia. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, das condições especificadas, não sendo extensivos a qualquer outro. Esta calibração não garante o desempenho do equipamento durante a utilização em condições diferentes das especificadas. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente este conteúdo original. O prazo de validade, quando aplicável, está no parte inferior da identificação do instrumento.

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Sitar C.
CEP: 89040-879
Florianópolis - SC
Caixa Postal 5003

Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2119
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 78.626.363/0001-24
Insc. Est. 251.378.241
Insc. Mun. 50.111-5



Laboratório de
FORÇA, PRESSÃO E MASSA
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 10/03/11

Data da Emissão: 16/03/11

n. 1012/11

Página: 2 de 4

8. RESULTADOS:

8.1. Intervalo de Medição: 0 a 500 N - Sentido: Compressão

TABELA DE RESULTADOS

Valor Nominal SMP		Valor Medido SMC	Correção	U	k	Var
[N]		[N]	[N]	[N]		
100,01	-0,4055	99,97	0,04	0,25	2,28	10
149,99	-0,6096	150,08	-0,09	0,43	2,87	4
199,99	-0,8126	199,99	0,00	0,27	2,37	8
250,00	-1,0116	249,97	0,03	0,28	2,37	8
300,00	-1,2190	299,95	0,05	0,48	2,87	4
349,99	-1,423	350,00	-0,01	0,28	2,37	8
399,99	-1,626	400,04	-0,05	0,28	2,37	8
500,01	-2,033	500,00	0,01	0,49	2,87	4

Equação Característica de Resposta:

$$F = a \cdot X^0 + b \cdot X^1 + c \cdot X^2 + d \cdot X^3$$

F: Força aplicada ao instrumento calibrado [N]

X: Leitura no instrumento calibrado [mV/V]

a=	-5,0107952E-01
b=	-2,4759552E+02
c=	-1,2592588E+00
d=	-2,7840838E-01

Este certificado atesta os resultados de medição de força/pressão, que estão em conformidade com o procedimento e padrão nacional de medida. A Equivalência é atribuída de acordo do Regulamento Múltipla Escala, e homologada pelo Instituto Nacional de Metrologia, com o objetivo de garantir a rastreabilidade da medição. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, não sendo aplicável a quaisquer outros. Esta calibração não inclui o tratamento do sistema metrologia estabelecido na regulamentação metrologia. A CERTI atende a legislação, desde que o certificado, dentro das condições estabelecidas no presente certificado, seja utilizado em situações autorizadas pelo fabricante.

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Campus da Universidade Federal de
Santa Catarina - UFSC

Sector C
CEP: 88045-070
Florianópolis - SC
Caixa Postal: 5953

Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2115
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 76.628.363/0001-34
Insc. Est. 251.078.241
Insc. Mun. 50.111-5



Laboratório de
FORÇA, PRESSÃO E MASSA
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 10/03/11

Data da Emissão: 16/03/11

n. 1012/11

Página: 3 de 4

6. RESULTADOS:

6.1. Intervalo de Medição: 0 a 500 N - Sentido: Tração

TABELA DE RESULTADOS						
Valor Nominal	Valor Medido		Correção	U	k	v_{eff}
SMP	SMC					
[N]	[mV/V]	[N]	[N]	[N]		
99,99	0,4049	100,03	-0,04	0,17	2,00	infinito
149,99	0,6070	149,90	0,09	0,24	2,21	13
199,99	0,8102	200,02	-0,03	0,70	3,31	3
249,98	1,013	249,98	0,00	0,78	3,31	3
299,98	1,215	300,00	-0,02	1,87	4,53	2
349,99	1,418	350,04	-0,05	1,35	4,53	2
399,99	1,620	399,92	0,07	1,75	4,53	2
500,04	2,025	500,06	-0,02	1,68	4,53	2

Equação Característica de Resposta:

$$F = a \cdot X^0 + b \cdot X^1 + c \cdot X^2 + d \cdot X^3$$

F: Força aplicada ao instrumento calibrado [N]

X: Leitura no instrumento calibrado [mV/V]

a=	1,8259762E-01
b=	2,4658717E+02
c=	5,0120014E-02
d=	2,7245682E-02

Este certificado atesta que o instrumento de medição foi calibrado pelo Laboratório de Referência e compareceu às condições de uso e condições de medição. A Emissão e a validade do Atestado de Fosse Instrumental Medido (AFIM) é reservada ao Laboratório de Referência. O Certificado de Calibração e o Atestado de Fosse Instrumental Medido (AFIM) são válidos somente se o instrumento de medição for utilizado dentro das condições de uso e condições de medição. Este certificado não garante o desempenho do instrumento de medição ao longo de sua vida útil. O Certificado de Calibração e o Atestado de Fosse Instrumental Medido (AFIM) são válidos somente se o instrumento de medição for utilizado dentro das condições de uso e condições de medição.

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

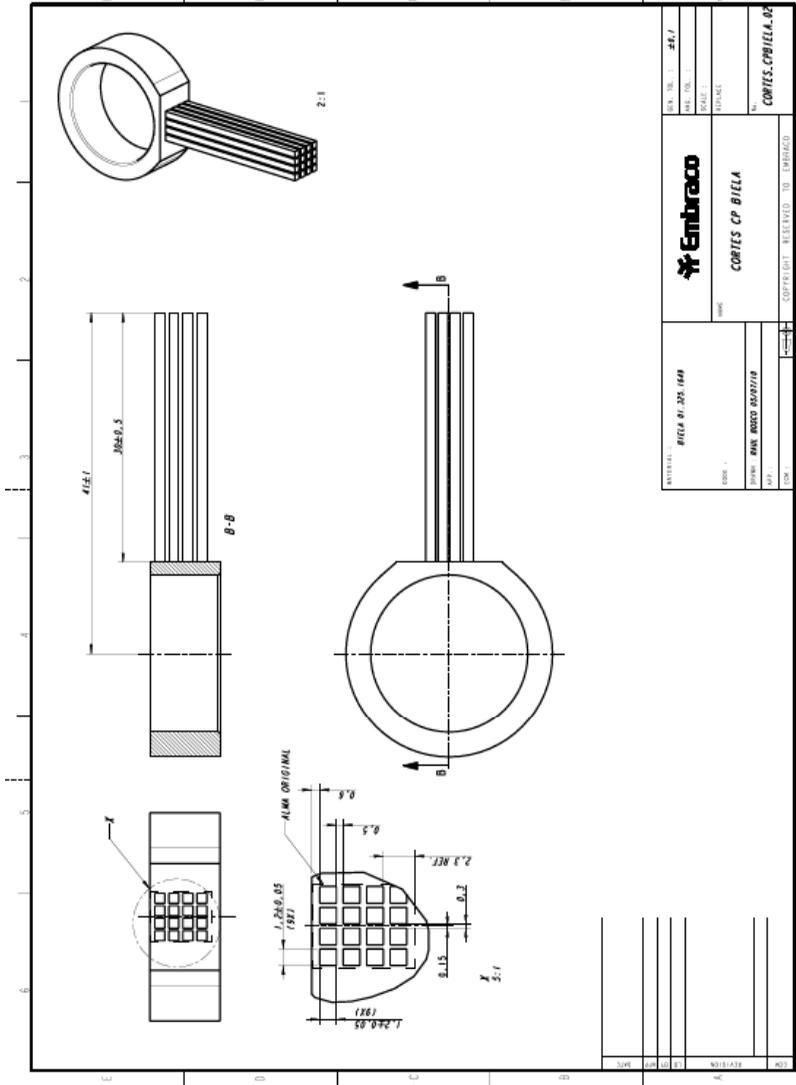
Campus da Universidade Federal de
Santa Catarina - UFSC

Sector C
CEP: 88049-079
Florianópolis - SC
Caixa Postal 963

Tel.: +48 3229 2121
Fax: +48 3229 2119
metriologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 78.626.353/0001-04
Insc. Est. 251.378.041
Insc. Mun. 50.111-5

APÊNDICE A



APÊNDICE B

