

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBULAÇÕES COM E SEM
REPARO COMPÓSITO, SUBMETIDAS A PRESSÕES
HIDROSTÁTICAS INTERNAS**

PETER FALUHELYI

ORIENTADOR: FLAMÍNIO LEVY NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM - DM - nº 07

BRASÍLIA - DF: 07/2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM TUBULAÇÕES COM E SEM
REPARO COMPÓSITO, SUBMETIDAS A PRESSÕES
HIDROSTÁTICAS INTERNAS**

PETER FALUHELYI

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Profº Flamínio Levy Neto, Ph.D., ENM-UnB
(Orientador)**

**Profº Luiz Cláudio Pardini, Ph.D., ITA-CTA
(Examinador Externo)**

**Profº. Edson Paulo da Silva, Dr.Ing., ENM-UnB
(Examinador Interno)**

**Profº. Guilherme Caribé de Carvalho, Ph.D., ENM-UnB
(Membro Suplente)**

BRASÍLIA-DF, 3 DE JULHO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

FALUHELYI, PETER

Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas, [Distrito Federal] 2006.

xviii, 138p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Reparo em tubulações

2.Materiais compósitos

3.Elementos finitos

4.Análise de tensões e deslocamentos

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FALUHELYI, P. (2006). Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação DM-nº 07, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Peter Faluhelyi.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas.

GRAU: Mestre ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Peter Faluhelyi
SQS 402 Bloco L ap 208 – Asa Sul.
70236-120 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Maria, mesmo à distância, pelas belas cartas de incentivo para este trabalho e ao meu pai, Zoltan Faluhelyi, já falecido, mas do qual guardo na memória o estímulo para me tornar pesquisador, e me debruçar à pesquisa científica.

Agradeço ao Prof. Flaminio Levy Neto pela dedicação incansável como orientador deste trabalho, e ao Prof. Edson Paulo da Silva, pelas sugestões como coordenador do projeto da Eletronorte, que tornou realidade os objetivos experimentais desta dissertação.

Agradeço aos professores do curso de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica em Sistemas Mecatrônicos, destacando o Prof. Carlos Llanos, em Instrumentação, o Prof. Antônio Piratelli, em Metrologia, e o Prof. Guilherme Caribé, em Análise de Sistemas Mecânicos.

Agradeço à Isabel Borba, secretária da pós-graduação, por ter me auxiliado com as documentações exigidas. E aos técnicos de laboratório Edson Lucas e Tarsis de Oliveira, aos técnicos da oficina mecânica João A. Xavier, Osiel R. Nascimento, Marcos Roberto P. da Silva, Cláudio Pereira e Artur Alves Rocha, pela colaboração efetiva na preparação dos corpos de prova. E à Margareth de Palermo, do CNPq, por revisar o texto da dissertação.

Agradeço aos colegas Roberson Silva, Rafael Teixeira, Gabriela Müller e ao recém-formado engenheiro Flávio Alencar, pela cooperação na rotina exaustiva dos procedimentos experimentais, no meu plano de trabalho do projeto da Eletronorte “Comportamento Mecânico de Dutos Poliméricos Reparados com Materiais Compósitos”.

Agradeço à Eletronorte pela parceria com a Universidade de Brasília (UnB) no projeto “Aplicação de Materiais Compósitos para Reparo de Tubulações Industriais”.

À minha mulher Lígia, e aos
meus filhos Bernardo e Igor.

RESUMO

Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas.

Autor: Peter Faluhelyi

Orientador: Flamínio Levy Neto

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, julho de 2006

Os principais danos que as tubulações industriais e prediais apresentam, em geral, são trechos amassados e/ou com sulcos superficiais e perda de material por corrosão. A necessidade de reparo surge pela verificação da espessura da parede e extensão do dano ao longo do tubo. Em caso de vazamento, depois de estancar a saída do fluido, uma inspeção mais rigorosa da seção da tubulação danificada pode determinar o melhor tipo de reparo para aquele trecho. É importante ressaltar que a tecnologia de reparo compósito apresenta vantagens para uma situação de dano em tubulações metálicas e poliméricas onde se tornaria oneroso interromper o processo de transporte de fluidos gasosos ou líquidos. O reparo compósito pode ser realizado para qualquer diâmetro, e a metodologia permite que o mesmo seja realizado em local onde há falta de energia elétrica e pouco espaço operacional para a instalação do reparo. O presente trabalho foi desenvolvido com a utilização de tubos íntegros e desbastado, de PVC rígido, tendo como objetivo geral analisar o comportamento mecânico desses tubos com e sem reparos compostos, submetidos à pressão hidrostática interna. Foram estudados tubos de PVC de parede fina, com uma razão entre o diâmetro (D) e a espessura (t), D/t , igual a 55,6. Os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros colados no centro do tubo. Nos ensaios de tubos íntegros, com 5 horas de duração, observou-se o efeito da viscoelasticidade nas medidas de deformações circunferencial e longitudinal. Os tubos íntegros, desbastados e reparados passaram por simulação numérica do programa COMPSHELL, para a estimativa da pressão de falha, utilizando o critério de falha de Tsai-Hill, e os resultados comparados com os dos experimentos. A viscoelasticidade não se evidenciou, no trecho reparado, durante os ensaios de deformações circunferencial e longitudinal em tubos reparados com laminado de matriz epóxi reforçado com fibra de vidro-E, moldados sem vácuo. Todos os resultados experimentais foram confrontados com os previstos pelo programa COMPSHELL, baseado na teoria elástica para tubos de parede fina e a correlação entre eles variou de -129,43 % a +14,89 %.

ABSTRACT

The stress analysis of internally pressurized pipes with and without composite repairs.

Author: Peter Faluhelyi

Supervisor: Flaminio Levy Neto

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, July of 2006

The main damages that industrial and building pipes present, in general, are sections kneaded, superficial ridges and lost of material by corrosion. The repair necessity appears by the verification of the thickness of the wall and extension of the damage along one of the pipe. In case of leaking, after stanching the exit of the fluid, an inspection more rigorous of the section of the damaged tube it can determine the best type of repair for that section. It is important to stand out that the technology of composite repair presents advantages for a damage situation in metallic and polymeric pipes, where it would become onerous to stop the process of gaseous or liquid fluid transport. The composite repair can be carried out for any diameter, and the methodology allows to it be installed in places, where it there is lack of electric energy and little operational space for the installation of the repair. The present work was developed, with the use of perfect and machined pipes, rigid PVC, having as general objective to analyze the mechanical behavior of these pipes with and without composite repairs, submitted to the internal hydrostatic pressure. The pipes investigated are thin wall PVC tubes, with the ratio between diameter (D) over thickness (t), D/t , equal the 55,6. The specimens were instrumented with strain gages in the center of the pipe. In the tests of perfect pipes, with 5 hours of duration, the effect of the viscoelasticity in the measurements of circumferential and longitudinal deformations was observed. The perfect, machined and repaired pipes were analyzed using in the numerical simulation the program COMPSHELL, adopting the failure criterion of Tsai-Hill, and the results compared with the ones of the experiments. Viscoelasticity was not observed, in the repaired region, during the tests, for the circumferential and longitudinal deformations, in repaired pipes with laminate of matrix epoxy reinforced with E-glass fiber, molded without vacuum. All the results were compared the numerical simulation with the program COMPSHELL, based on the theory elastic for pipes of fine wall, and the correlation between them -129,43 % a +14,89 %.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - A SITUAÇÃO ATUAL DE REPAROS CONVENCIONAIS.....	1
1.2 - PRINCIPAIS CENÁRIOS DE DANOS EM TUBULAÇÕES E DUTOS.....	2
1.3 - OS REPAROS COMPÓSITOS ATUALMENTE EMPREGADOS.....	3
1.4 - O MERCADO DE TUBULAÇÕES E DUTOS.....	8
1.5 - OBJETIVOS DO TRABALHO.....	8
1.6 - METODOLOGIA.....	9
1.7 - DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	10
2 - MODELAMENTO MATEMÁTICO PARA TUBOS E REPAROS..	12
2.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	12
2.2 - SOLUÇÕES ANALÍTICAS	12
2.2.1 - Soluções pela Teoria de Cascas Delgadas.....	12
2.2.1.1 - Solução para cascas cilíndricas com pressão interna uniforme.....	19
2.2.1.2 - Solução para tubo íntegro biengastado com pressão hidrostática interna..	20
2.2.2 - Deformação viscoelástica de material plástico pelo modelo de Burger..	25
2.3 - SOLUÇÕES NUMÉRICAS.....	27
2.3.1 - Método dos elementos finitos.....	27
2.3.2 - Teoria Macromecânica de Laminados Compósitos	30
2.3.3 - Programa COMPSHELL	35
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1 - VISÃO GERAL DOS ENSAIOS	39
3.2 - PROPRIEDADES GERAIS DE TUBO DE PVC RÍGIDO	40
3.3 - CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA.....	41
3.3.1 - Determinação de raios e espessura médios	44
3.4 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	46
3.4.1 - Configuração dos corpos de prova.....	46
3.4.2 - Dimensionamento e colagem das tampas	48
3.4.3 - Metodologia de desbaste	52
3.4.4 - Metodologia de reparos compósitos.....	53

3.5 - INSTRUMENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	55
3.5.1 - Sistema de aquisição de dados ADS 2000.....	59
3.6 - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO DE PRESSÃO	60
3.7 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	61
3.7.1 - Considerações gerais	61
3.7.2 - Corpo de prova de tubo íntegro de alumínio.....	62
3.7.3 - Corpos de prova de tubo de PVC rígido (TI, TD e TR).....	63
4 - RESULTADOS OBTIDOS	65
4.1 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	65
4.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	
COMPLEMENTARES.....	72
5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	77
5.1 – SOLUÇÃO ANALÍTICA COMPARADA À SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE	
TUBO ÍNTEGRO BIENGASTADO.....	77
5.2 – PREVISÕES ESTIMADAS DA SIMULAÇÃO PELO COMPSHELL.....	78
5.3 – MODELO DE BURGER COMPARADO AOS EXPERIMENTOS	80
6 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	83
6.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	83
6.2 – CONCLUSÕES.....	83
6.3 –TRABALHOS FUTUROS PARA TUBOS.....	84
REFERÊNCIAS	85

APÊNDICES

A – ARQUIVO DE ENTRADA DO COMPSHELL DE TUBO ÍNTEGRO.....	88
B – ARQUIVO DE ENTRADA DO COMPSHELL DE TUBO REPARADO.....	91
C – ALGORITMO EM MATLAB 6.0 DA SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	95
D – ALGORITMO EM MATLAB 6.0 DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE REPAROS COMPÓSITOS.....	99
E – TABELA DE DADOS EM EXCEL DAS CURVAS EXPERIMENTAL E ANALÍTICA DA DEFORMAÇÃO CIRCUNFERENCIAL VS. TEMPO DO CP (TI) N°2.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Soluções analítica e numérica para tubo íntegro biengastado de PVC e Al para pressão hidrostática interna $p = 0,60$ MPa.....	38
Tabela 3.1 - Propriedades de tubo de PVC rígido.....	40
Tabela 3.2 -Medições do raio médio e desvio padrão de amostras de tubo de PVC, através de um esfêrometro, à temperatura ambiente média de 21°C.....	45
Tabela 3.3 - Medições do raio médio e desvio padrão de amostras de tubo de PVC, através de um paquímetro, à temperatura ambiente média de 21°C	45
Tabela 3.4 - Medições de espessura média e desvio padrão de amostras de tubo de PVC, através de um paquímetro, à temperatura ambiente média de 21°C	46
Tabela 3.5 - Médias de diâmetro e espessura na região desbastada de tubos de n ^{os} 1 a 6...47	47
Tabela 3.6 - Identificação detalhada dos corpos de prova de n ^{os} 1 a 6.....	47
Tabela 3.7 - Propriedades físicas do araldite LY 1316 BR empregado nos tubos	50
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas de tecido de algodão	54
Tabela 3.9 - Quantidades de massa e volume de reforço e resina utilizados nos reparos ..	55
Tabela 3.10 - Propriedades mecânicas dos reparos utilizados no COMPSHELL.....	55
Tabela 3.11 - Quadro resumo das quantidades, tipos, direções e características dos extesômetros nos corpos de prova (n ^{os} 1 e 2) e desbastados (n ^{os} 3 e 4).	56
Tabela 3.12 - Quadro resumo das quantidades, tipos, direções e características dos extesômetros nos corpos de prova n ^{os} 5 e 6.....	58
Tabela 3.13 - Propriedades mecânicas do tubo de alumínio 6063 - T5	62
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do PVC rígido e de reparos compósitos.	65
Tabela 4.2 - Resultados obtidos pelo COMPSHELL para os corpos de prova TI e TD.	66
Tabela 4.3 - Espessura do reparo ideal para corpos de prova (TR).....	69
Tabela 4.4 - Resultados do COMPSHELL de tubos TRV e TRE para pressão de ruptura. 70	70
Tabela 4.5 - Índice de integridade de tubos TRV e TRE em relação ao tubo TI	71
Tabela 4.6 - Resultados de tubo íntegro de alumínio para posição $x = 250$ mm.....	72
Tabela 4.7 - Resultados de corpo de prova n ^o 1 (TI) para posição $x = 250$ mm	72
Tabela 4.8 - Resultados do corpo de prova n ^o 2 (TI) para posição $x = 250$ mm.	73
Tabela 4.9 - Resultados do corpo de prova n ^o 3 (TD) para posição $x = 250$ mm	73
Tabela 4.10 - Resultados do corpo de prova n ^o 4 (TD) para posição $x = 250$ mm.	73
Tabela 4.11 - Resultados do corpo de prova n ^o 5 (TR) para posição $x = 250$ mm.....	74
Tabela 4.12 - Comparação entre os resultados experimentais e os do COMPSHELL.	74

Tabela 5.1 - Comparação entre a solução analítica e a solução numérica de tubos íntegros de PVC e de alumínio para $p = 0,60$ MPa.....	78
Tabela 5.2 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de tubo íntegro (TI n°2) e desbastado (TI n°4) para $p = 0,60$ MPa.....	81
Tabela 6.1 - Comparação entre a solução analítica e a solução numérica de tubos íntegros de PVC e de alumínio para $p = 0,60$ MPa.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Braçadeira com enchimento elastomérico.....	3
Figura 1.2 - Conector com vedação elastomérica.....	3
Figura 1.3 - Braçadeira com bujão de suspiro.....	4
Figura 1.4 - Reparo de tubo com conectores.....	4
Figura 1.5 - Reparo hermético em flange.....	5
Figura 1.6 - Braçadeira do tipo <i>stand off</i> para trabalho médio.....	5
Figura 1.7 - Reparo tipo luva com enchimento de epóxi.....	6
Figura 1.8 - Reparo composto de fibra de carbono em tubo metálico.....	7
Figura 1.9 - Representação de esforços e de deslocamentos num cilindro de parede fina engastado numa extremidade e na outra, apoiado com liberdade axial.....	9
Figura 2.1 - Representação de esforços resultantes e de deslocamentos, coordenadas principais, raios de curvatura, em um elemento de casca de revolução.....	13
Figura 2.2 - Tubo fechado e biengastado com pressão hidrostática interna uniforme.....	21
Figura 2.3 - Curvas de distribuição de deslocamento radial (w) de tubo íntegro biengastado de PVC, submetidos à mesma pressão hidrostática interna.....	23
Figura 2.4 - Curvas de distribuição de resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo íntegro biengastado de PVC, com a mesma pressão hidrostática interna.....	23
Figura 2.5 - Curvas de distribuição de deslocamento radial (w) de tubo íntegro biengastado de alumínio, submetidos à mesma pressão hidrostática interna.....	24
Figura 2.6 - Curvas de distribuição de resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo íntegro biengastado de alumínio, com a mesma pressão hidrostática interna.....	24
Figura 2.7 - Representação do modelo de Burger.....	26
Figura 2.8 - Esquema do método geral para análise de sistemas discretos.....	29
Figura 2.9 - Seqüência de etapas para aplicação do Método dos Elementos Finitos.....	30
Figura 2.10 - Representação de uma lâmina com as tensões principais, σ_1 e σ_2 , e de cisalhamento, τ_{12} e τ_{21} , e o sistema de coordenadas principais 1 e 2.....	31
Figura 2.11 - Representação das resultantes de tensões e de momentos no laminado.....	32
Figura 2.12 - Representação geométrica de um laminado com 5 camadas.....	33
Figura 2.13 - Representação de um elemento finito de casca axissimétrica.....	36
Figura 2.14 - Modelagem geral do COMPSHELL para tubos.....	37
Figura 3.1 - Esquema de ensaio do corpo de prova com componentes de ligação entre equipamentos, instrumentos e sistemas de aquisição de dados.....	39

Figura 3.2 - Instrumentos para determinação do raio e da espessura médios.....	41
Figura 3.3 - Parâmetros geométricos para medição do raio médio do tubo.....	42
Figura 3.4 - Bloco em “V” (canto superior esquerdo) na mesa de desempenho vermelha...	42
Figura 3.5 - Traçado das linhas circunferenciais com paquímetro de altura.....	43
Figura 3.6 - Medição do parâmetro, δ , de variação de raio, com o esferômetro.....	43
Figura 3.7 - Representação do grau de ovalização na região central de uma amostra a ser desbastada.....	44
Figura 3.8 - Representação de CP de tubo íntegro (TI) tampado nas extremidades.....	47
Figura 3.9 - Representação de CP de tubo desbastado (TD) tampado nas extremidades....	48
Figura 3.10 - Representação de CP de tubo reparado (TR) tampado nas extremidades.....	48
Figura 3.11 - Tampa encaixada no tubo e colada com araldite industrial da Ciba Geigy....	49
Figura 3.12 - Perfil da tampa de alumínio com sulcos para a colagem com epóxi.....	49
Figura 3.13 - Modelo de equilíbrio de forças nas tampas dos corpos de prova.....	50
Figura 3.14 - Bancada de ensaios com tampa acrílica de 5 mm de espessura.....	52
Figura 3.15 - Processo de desbaste de tubo de PVC no torno da oficina (SG-9).....	53
Figura 3.16 - Processo de colagem dos extensômetros tipo roseta (tubo de alumínio) e tipo unidirecional (tubo de PVC).....	56
Figura 3.17 - Localização e direção dos extensômetros (roseta) nos CP's n ^{os} 1 e 2.....	57
Figura 3.18 - Localização e direção dos extensômetros (roseta) nos CP's n ^{os} 3 e 4.....	57
Figura 3.19 - Localização e direção dos extensômetros (roseta) nos CP's n ^{os} 5 e 6.....	58
Figura 3.20 - Visão geral do equipamento ADS 2000, monitor e o microcomputador.....	59
Figura 3.21 - Processo de colagem dos extensômetros tipo roseta (tubo de alumínio) e tipo unidirecional (tubo de PVC).....	60
Figura 3.22 - Bancada de ensaios com a bomba hidráulica e a mangueira reforçada.....	61
Figura 3.23 - Tubo íntegro de alumínio pressurizado até 0,6 MPa, no regime elástico.....	62
Figura 3.24 - CP n ^o 1 de tubo íntegro de PVC rompido a $p = 1,4$ MPa.....	63
Figura 3.25 - CP n ^o 3 de tubo desbastado de PVC rompido a $p = 0,75$ MPa.....	64
Figura 3.26 - CP n ^o 5 de tubo reparado de PVC rompido a $p = 1,4$ MPa.....	64
Figura 4.1 - Deslocamento radial (w) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa.....	66
Figura 4.2 - Deslocamento longitudinal de tubo TI para $p = 0,60$ MPa.....	67
Figura 4.3 - Resultante de tensão circunferencial (N_{θ}) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa.....	67
Figura 4.4 - Resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa.....	67
Figura 4.5 - Deslocamento radial (w) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa.....	68
Figura 4.6 - Resultante de tensão circunferencial (N_{θ}) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa.....	68

Figura 4.7 - Resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa.....	68
Figura 4.8 - Deslocamento radial de tubo TRE para $p = 0,60$ MPa.....	69
Figura 4.9 - Deslocamento radial de tubo TRV com espessura de reparo de 0,16 mm para $p=0,60$ MPa.....	70
Figura 4.10 - Deslocamento radial de tubo TRV com espessura de reparo de 0,25 mm para $p=0,60$ MPa.....	71
Figura 4.11 - Curvas comparativas de simulação numérica e experimental de deformação circunferencial <i>versus</i> tempo do CP nº1 $P=0,60$ MPa.....	75
Figura 4.12 - Curvas comparativas de simulação numérica e experimental de deformação circunferencial <i>versus</i> tempo do CP nº2 $P=0,60$ MPa.....	75
Figura 4.13 - Curvas comparativas de simulação numérica e experimental de deformação circunferencial <i>versus</i> tempo do CP nº4 $P=0,60$ MPa.....	76
Figura 4.14 - Curvas comparativas de simulação numérica e experimental de deformação <i>versus</i> tensão na direção circunferencial do CP nº5 $P=0,60$ MPa.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AEA T.C.	- Associação privada da Agência Britânica de Energia Nuclear
a	parâmetro geométrico do esferômetro
[A]	matriz acoplamento cisalhamento-extensão de laminados compósitos
[B]	matriz acoplamento flexão-extensão de laminados compósitos
COMPSHELL	programa de elementos finitos para tubos axissimétricos
CP	corpo de prova preparado com tubo
d	densidade dos tubos e dos materiais compósitos
[D]	matriz acoplamento cisalhamento-extensão de laminados compósitos
D	diâmetro nominal do tubo cilíndrico
D_φ	módulo de elasticidade à flexão em relação à coordenada meridional
D_θ	módulo de elasticidade à flexão em relação à coordenada circunferencial
ENM	- Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília
E	módulo de Young de material isotrópico da teoria de cascas delgadas
E_1, E_2	módulos de Young nas direções principais de laminados compósitos
E_φ	módulo de Young na direção meridional ou longitudinal
E_θ	módulo de Young na direção circunferencial
Eletronorte	- Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A.
G_{12}	módulo de cisalhamento da macromecânica de laminados
IPC 2004	- International Pipeline Conference, em 2004
k	extensão de colagem da tampa no tubo
k_1^0, k_2^0 e k_{12}^0	variações de curvatura principais referente ao plano médio do laminado
L	comprimento do tubo
N_φ	Resultante de tensão normal na direção meridional ou longitudinal
N_θ	Resultante de tensão normal na direção circunferencial
$N_{\varphi\theta}, N_{\theta\varphi}$	Resultantes de tensão de cisalhamento
M_φ	Resultante de momento fletor na direção longitudinal
M_θ	Resultante de momento fletor na direção circunferencial
$M_{\varphi\theta}, M_{\theta\varphi}$	Resultantes de momento torçor
PVC	Cloreto de Polivinila

PP	Polipropileno
p	pressão hidrostática interna uniformemente distribuída
Q_φ	resultante de esforço cortante em relação à direção meridional
$[Q]$	matriz de rigidez de uma lâmina nas direções 1 e 2
$[\bar{Q}]$	matriz de rigidez, 3x3, transformada da lei generalizada de Hooke
R	raio do tubo
r_θ	raio de curvatura da coordenada curvilínea circunferencial
r_φ	raio de curvatura da coordenada curvilínea meridional ou longitudinal
SES	- Stress Engineering Services, Inc.
T	temperatura de operação.
T_g	temperatura de transição vítrea
s	coordenada ao longo do comprimento do tubo no COMPSHELL
t	espessura de parede de tubo
u	deslocamento meridional ou longitudinal
v	deslocamento circunferencial
w	deslocamento radial
$x = \varphi$	posição meridional ou longitudinal
$y = \theta$	posição circunferencial
z	coordenada ao longo da espessura do tubo
z_k	coordenada ao longo da espessura da camada k de um laminado
α	ângulo entre a tensão normal e a fibra do laminado compósito
β	rotação da casca em relação ao eixo meridional
γ_{12}^k	deformação angular de cisalhamento na camada k de um laminado
δ	variação de raio medida pelo esferômetro
$\varepsilon(t)$	deformação em função do tempo do modelo de viscoelasticidade
ε_c	deformação circunferencial pelo deslocamento radial do COMPSHELL
$\{\varepsilon\}$	vetor deformação da lei generalizada de Hooke
$\varepsilon_1^k, \varepsilon_2^k$	deformações nas direções principais na camada k de um laminado
η_1, η_2	constantes de amortecedores do modelo de viscoelasticidade de Burger
ξ_1, ξ_2	constantes de molas do modelo de viscoelasticidade de Burger
$\nu_{\varphi\theta}, \nu_{\theta\varphi}$	coeficientes de Poisson da teoria elástica de cascas delgadas
ν_{12}, ν_{21}	coeficientes de Poisson da macromecânica de laminados compósitos
σ_1, σ_2	tensões normais principais da macromecânica de laminados compósitos

σ_x, σ_y	tensões normais com ângulo α em relação às fibras da lâmina
$\sigma_\varphi, \sigma_\theta$	tensões normais de uma lâmina genérica k
$\{\sigma\}$	vetor tensão normal da lei generalizada de Hooke
$\sigma(t)$	tensão normal em função do tempo do modelo de viscoelasticidade
τ	tensão de cisalhamento entre o tubo e a tampa colada com epóxi
τ_{12}, τ_{21}	tensões cisalhantes da macromecânica de laminados compósitos
$\tau_{\varphi\theta}, \tau_{\theta\varphi}$	tensões cisalhantes de uma lâmina genérica

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – A SITUAÇÃO ATUAL DE REPAROS CONVENCIONAIS

O transporte de fluidos gasosos e líquidos, em dutos e tubulações, é importante para o desenvolvimento econômico da sociedade contemporânea. O custo do sistema de tubulação é relevante, e, em média, representa 20% do total do projeto de uma planta industrial, bem como 45 a 50% do custo total da instalação dos equipamentos e 20 a 25% do custo total de construção de uma planta industrial (Telles, 1996). Existem diversos tipos de fluidos, mas os corrosivos e de temperaturas elevadas são os que mais afetam os sistemas de tubulação e dutos. Pode-se citar o complexo sistema de infra-estrutura norte-americano, referente ao transporte de fluidos por sistemas de tubulação e dutos, em que existem dados estatísticos de avarias que mostram as dificuldades enfrentadas para solucionar problemas de danos utilizando a tecnologia de reparo convencional deste sistema (SES, 2002).

Os reparos convencionais são classificados em quatro tipos básicos que se apresentam como braçadeiras, luvas, flanges e conectores. Acrescentando que, nos processos industriais, nos casos de troca da seção de tubulação danificada com conectores nas junções, bem como, no reparo de luvas soldadas, a metodologia de reparo requer interrupção do fluxo de produtos. A interrupção de um processo industrial pode ser morosa e acarretar prejuízos às plantas industriais. Outro motivo que força a mudança para novas metodologias de reparo compósito é a preocupação com as limitações para instalação da maioria dos reparos convencionais em sistemas de tubulações e dutos existentes, que, em geral, estão em funcionamento, em alguns países, com idades próximas ao tempo médio de durabilidade das tubulações, que é de 50 anos (SES, 2001). A maioria das instalações industriais com reparos convencionais em tubulação metálica apresenta, muitas vezes, dificuldades a serem contornadas, que são, dentre outras, a falta de espaço operacional conveniente, a limitação em relação ao diâmetro e a extensão do dano na tubulação, e ainda no caso da tubulação localizar-se no campo, pode haver ausência de instalação elétrica para soldas. Para resolver estes problemas, surge como solução a metodologia de reparos compósitos. O questionamento sobre os reparos convencionais fica mais claro, a seguir, quando se contextualizam os principais cenários de danos para tubulação metálica.

1.2 – OS PRINCIPAIS CENÁRIOS DE DANOS EM TUBULAÇÕES E DUTOS

Há três cenários principais de danos em tubulações e dutos metálicos, considerados na literatura (AEA, 2001): perda de metal na parede externa, perda de metal na parede interna e componente da tubulação com vazamento. Desta forma, o primeiro cenário ressalta o funcionamento da tubulação muitas vezes afetado por corrosão externa. As condições do ambiente de operação que envolve o tubo, as fissuras ou sulcos superficiais e a galvanização apresentam, em geral, formas de corrosão. O resultado da deterioração é a perda de metal, reduzindo a espessura das paredes do tubo, que pode ser localizada, como na parte inferior do tubo, no encontro com suportes de tubulação, e extensiva, no caso de trechos de isolamento térmica. É interessante acrescentar o exemplo de uma situação comum na superfície externa, que não necessariamente está associada a vazamento ou corrosão, que é o de uma pequena área amassada da tubulação. Neste caso, se as marcas de trechos amassados forem acima de 6 % (seis por cento) do diâmetro do tubo, precisa-se fazer reparo, para evitar intervenção naquele trecho no futuro (AEA, 2001). O reparo de uma seção de tubulação com trincas irá deter qualquer propagação de problemas, se as trincas não ameaçam a integridade do tubo. Para finalizar sobre os danos na superfície externa, ainda pode-se citar a ocorrência de trincas em solda ou do próprio tubo original, sem ser por perda de metal ou vazamento da tubulação, que exigem considerações especiais (AEA, 2001).

O segundo cenário ocorre ao transportar fluido em tubulação, especialmente substância que reage com a parede interna de um tubo, acarretando corrosão, erosão, ou uma combinação destes dois tipos de deteriorações. O cenário da reparação neste caso, não é ainda de vazamento na parte deteriorada. A escolha do tipo de reparo tem de levar em consideração a acomodação dos efeitos de deterioração, tanto externa quanto interna do tubo, até a vida útil do sistema de tubulação reparado. Caso contrário, a restauração da integridade do tubo será considerada de duração temporária. Corrosão e erosão são difíceis de serem quantificadas em relação à parede interna do tubo, ambos em termos de perda absoluta de metal e extensão dessa perda. Existem técnicas de inspeção, como a ultrassonografia e radiografia, para assistir nessa situação. O mais importante é obter o máximo de informação possível do dano ou deterioração para se escolher o método adequado de reparo. A deterioração da parede interna, além da mais visível existente na

parede externa do tubo, pode descartar a possibilidade de o tubo resistir às cargas de serviço.

Vazamento é a pior situação dentre os três cenários, e pode ser causado pela perda de metal da parede interna ou externa do tubo, e ainda, em solda de costuras ou juntas, ou do próprio tubo original. Em todos os casos onde há vazamento, será necessário o componente apropriado de reparo, não considerando apenas a pressão exigida, mas que também se ajuste à corrosividade e outros efeitos do fluido. Dependendo da extensão do dano, pode ser necessário um reparo localizado do tipo braçadeira ou por meio de dois conectores, trocando a seção da tubulação por um novo pedaço de tubo. As vedações elastoméricas, utilizadas em reparos tipo braçadeira (Figura 1.1) ou conector (Figura 1.2), podem estar sujeitas à deterioração na presença de certos fluidos, dentre eles, ácidos, cáusticos, hidrocarbonetos voláteis e aromáticos, por exemplo. Por causa de degradação ou relaxamento da vedação acontece o escapamento de fluido, que obriga a realizar uma operação para estancar ou tampar o vazamento, antes mesmo de se mexer no reparo. As vedações dos reparos convencionais são elastômeros, conforme Canevarolo (2002).

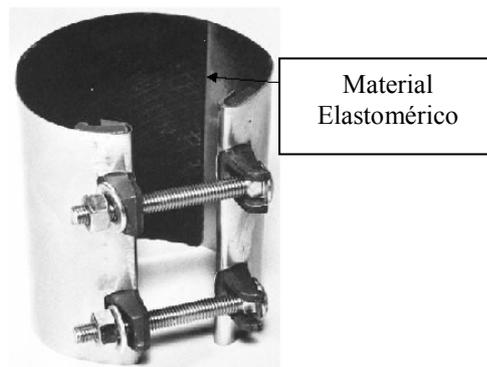


Figura 1.1 - Braçadeira com enchimento elastomérico (AEA, 2001, modificado)

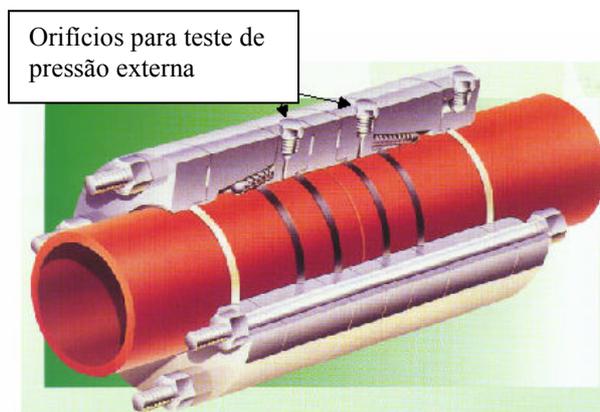


Figura 1.2 - Conector com vedação elastomérica (AEA, 2001, modificado)

Em alguns casos, é possível instalar uma braçadeira em tubos com vazamento, onde, após a fixação correta, aperta-se o bujão do suspiro (Figura 1.3). Deve-se observar a condição do componente de reparo, ao acomodar as cargas axiais da tubulação, especialmente utilizando conectores (1.4). Deve-se acrescentar que, no caso de vazamento em partes flangeadas de tubos (Figura 1.5), o problema provavelmente ocorre devido à corrosão ou relaxamento da face flangeada ou da área da junta. Além disso, é possível vazamento em soldas de flanges (AEA,2001).



Figura 1.3 - Braçadeira com bujão de suspiro (AEA, 2001)

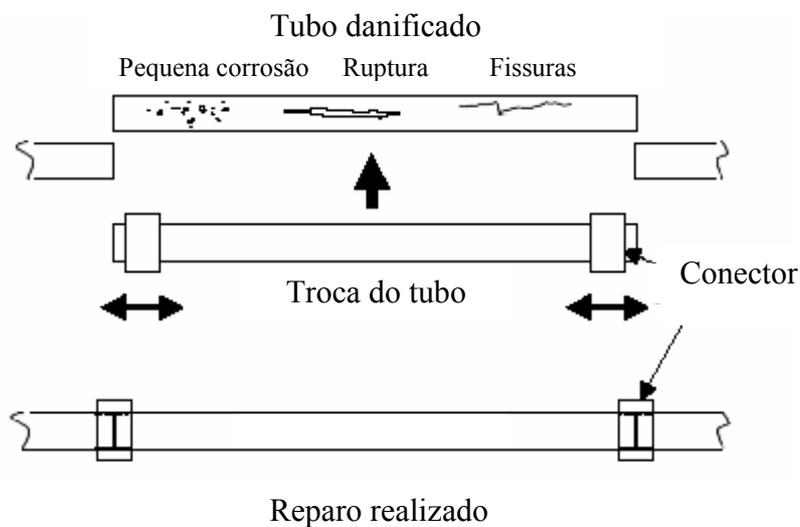


Figura 1.4 - Reparo de tubo com conectores

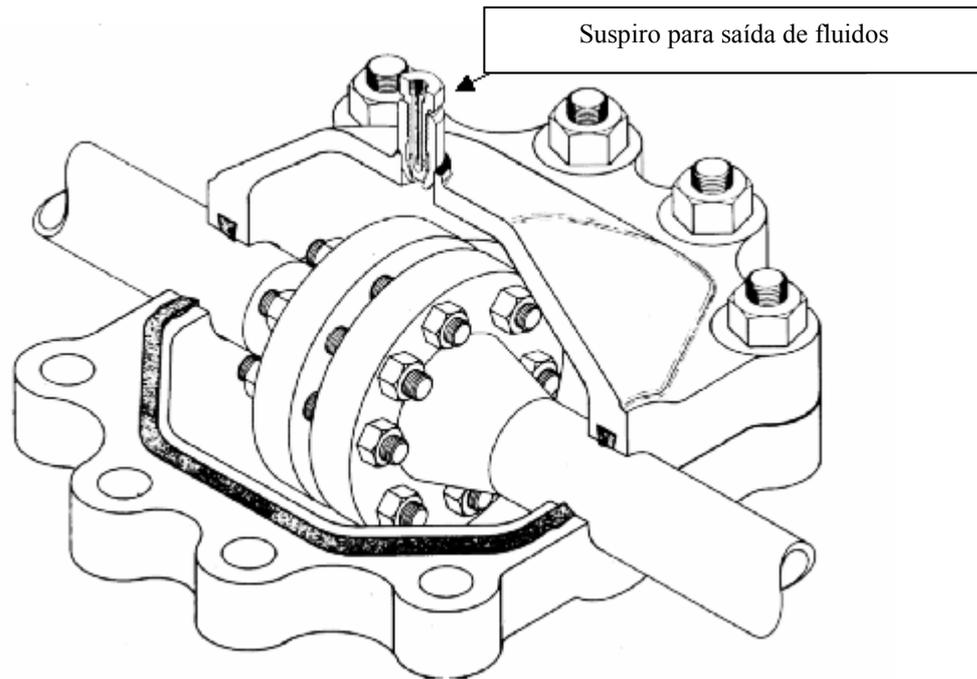


Figura 1.5 - Reparo hermético em flange (AEA, 2001, modificado)

Um dos aspectos fundamentais de dano ou deterioração depende das condições da superfície externa do tubo, que vai auxiliar na escolha do tipo de reparo a ser aplicado. Se acontecer que a vedação elastomérica não consiga fornecer forças suficientes na imediação do dano ou na área relativamente não afetada adjacente à área de maior dano, deve ser utilizada braçadeira tipo *stand off* (Figura 1.6). Neste caso, a superfície necessita ser restabelecida com algum tipo de material de enchimento. Tem sido utilizada também, uma luva de aço preenchida com epóxi e com vedação de resina poliéster (Figura 1.7), apropriada para danos com áreas extensivas. Este tipo de reparo tem aplicações para uma série de defeitos, incluindo corrosão, falhas que não se propagam, trechos amassados ou sulcos com orientações, axial e circunferencial, e anomalias associadas a soldas circunferenciais.



Figura 1.6 - Braçadeira tipo *stand off* para trabalho médio (AEA, 2001)

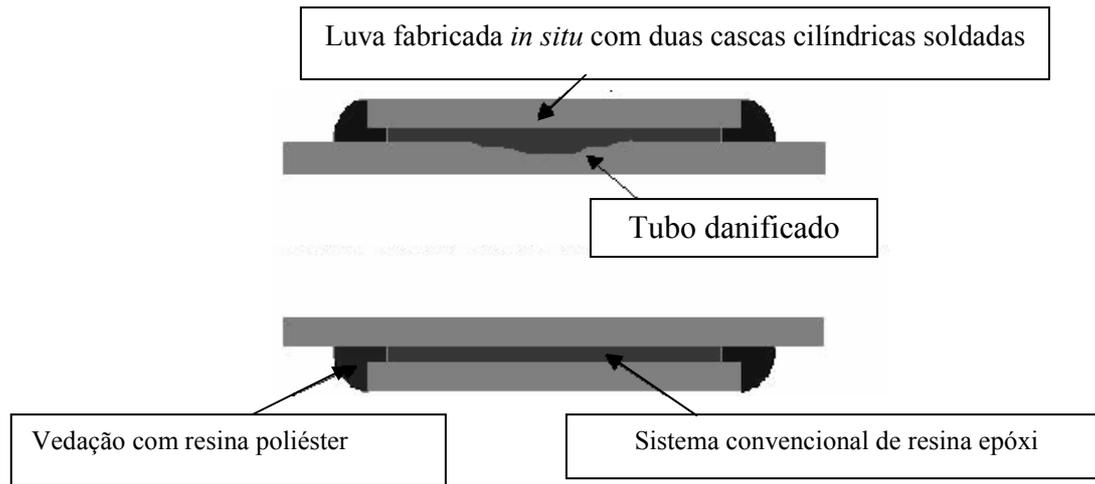


Figura 1.7 - Reparo tipo luva com enchimento de epóxi

1.3 – OS REPAROS COMPÓSITOS ATUALMENTE EMPREGADOS

Cenários semelhantes também se apresentam quando se pensa em reparar um sistema de tubulação com material compósito (AEA, 2001): corrosão externa, deterioração interna e dano mecânico. No caso de corrosão externa, sem vazamento, será utilizado o material compósito para reconstituição da integridade do tubo. Se a superfície externa for preparada apropriadamente, é provável que as deteriorações externas não continuem no tubo com o reparo compósito (Figura 1.8). Os danos mecânicos, como partes amassadas, sulcos e desgastes nos suportes de tubulação serão reparados com compósitos para restaurar a integridade do tubo. Na deterioração interna, por meio de corrosão ou erosão, ou combinação dessas duas, onde o tubo pode ou não estar vazando, é possível também utilizar material compósito para restabelecer a integridade do tubo. Entre os reparos atualmente empregados, os que utilizam luvas pré-moldadas compósitas estão associados ao desenvolvimento científico e tecnológico de materiais poliméricos. O período de descoberta dos polímeros passou por três grandes fases (Gorni, 2003): naturais, naturais com modificações, e sintéticos. As fibras sintéticas passaram por acelerado processo de industrialização no século 20, porque se mostraram superiores às fibras naturais, tanto na regularidade geométrica quanto nas propriedades mecânicas. Os processos industriais provocaram uma evolução nas fibras sintéticas e novas metodologias de reparo para tubos danificados por corrosão e/ou vazamento. Os reparos compósitos são constituídos de uma mistura de dois materiais, combinados para formar um novo material de engenharia útil

com propriedades sinérgicas (Barra, 2004). A luva pré-moldada compósita é utilizada como solução de mercado, que é uma mistura de uma matriz de poliéster reforçada na direção circunferencial do tubo com fibra de vidro-E (Clock Spring, 2000).

Os compósitos são classificados em particulados e fibrosos (Rabello, 2000). O compósito particulado é resultante da introdução de componentes que apresentam uma razão de aspecto (relação entre a maior e a menor dimensão do corpo) menor que três. Esses componentes são denominados fases particuladas ou não-fibrosas, e podem estar na forma de partículas, aglomerados de partículas, escamas ou flocos. Em quantidades suficientes para reduzir custos e propriedades físicas e/ou mecânicas dos compósitos, as cargas particuladas são adicionadas aos polímeros. Os compósitos fibrosos podem ser classificados em descontínuos e contínuos. As matrizes mais utilizadas comercialmente em reparos compósitos são as plásticas. O plástico é mais bem classificado, conforme as características mecânicas (Canevarolo, 2002) em termoplásticos, termorrígidos (ou termofixos) e elastômeros.

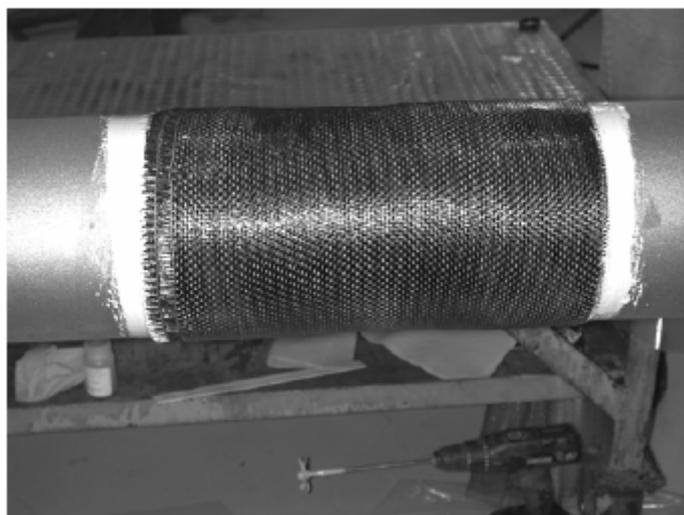


Figura 1.8 - Reparo compósito de fibra de carbono em tubo metálico (IPC, 2004)

As condições de trabalho da tubulação são observadas no contexto do reparo escolhido pelo tipo de fluido considerado (AEA, 2001). Três tipos comuns encontrados em plantas industriais: fluidos de grande utilização como diesel, água salgada, ar, substâncias de processo para drenagem; fluidos utilizando produtos químicos generalizados; e fluidos produzidos, incluindo hidrocarbonetos na forma de gás ou de condensado. A pressão e temperatura envolvidas nos reparos de tubulação, reforçados com fibras de vidro, serão de no máximo 5 MPa e de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Os valores de pressão são divididos em três categorias (AEA, 2001): até 0,5 MPa, em casos de pressão hidrostática e

drenos; até 2 MPa, em casos de utilização de água; até 5 MPa em caso de hidrocarbonetos. Para até 2 MPa de pressão, é subdividida em segurança crítica (água para incêndio, por exemplo) e em trabalhos de segurança não-crítica (para quaisquer líquidos, exceto a água). A duração para o reparo é temporária se considerada até dois anos de utilização, e permanente se for operar até o término da vida útil da tubulação.

1.4 – O MERCADO DE TUBULAÇÕES E DUTOS POLIMÉRICOS

A utilização de tubulações e dutos poliméricos recai em três grandes áreas do mercado: industrial, militar e aeroespacial (Hoa, 1991). Os tubos produzidos de material polimérico, chamados tubos de plástico, em geral, possuem boa resistência à corrosão e reduzido peso em comparação com os de aço ou alumínio. Entretanto, o desenvolvimento de materiais compósitos no século 20 propiciou a produção de tubulações e vasos de plástico reforçados em nível comercial, a partir da década de 60, com a combinação de matrizes de epóxi ou poliéster e de fibras, tais como, vidro-E, carbono, kevlar 49, para ambientes corrosivos e de pressões até 5 MPa (Hoa, 1991). Atualmente, os tubos de plástico, como o de cloreto de polivinila (PVC) e o de polipropileno (PP), estão no mercado da construção civil, para utilização em redes prediais, de água, esgoto e eletricidade.

Existem normas internacionais para projeto de manufatura e controle de qualidade de materiais poliméricos, utilizados tanto para confecção de tubos, como também de reparos compósitos com matrizes poliméricas, que podem ser exemplificadas, dentre outras, pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *British Standards Institution* e *The American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. As citadas são mais conhecidas, entretanto, países como a Alemanha, França e Canadá têm suas próprias sociedades de normas técnicas para compósitos, utilizados em tubos e vasos de pressão (Hoa, 1991).

1.5 – OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos principais deste trabalho serão: (a) comparar os resultados da solução analítica de Reissner, bem como os experimentais, com as simulações numéricas do programa COMPSHELL para tubos íntegros de parede fina, de PVC rígido e de alumínio, biengastados; (b) analisar o efeito do desbaste em tubos TD de PVC rígido; (c) realizar reparos compósitos em tubos TD de PVC rígido; e (d) analisar a eficácia dos reparos.

1.6 – METODOLOGIA

Será apresentada na revisão bibliográfica, a teoria de cascas delgadas que surgiu nas indústrias aeroespacial e petroquímica, nas quais estas cascas de revolução, em alguns casos, são sujeitas a cargas inerciais axiais, cargas centrífugas, pressão interna, gradientes axiais de temperatura, dentre outras (Kraus, 1967). Existe uma classe de cascas cilíndricas delgadas, denominadas tubos de parede fina, que, nas aplicações de engenharia, em geral, são sujeitas às pressões hidrostáticas internas. A Figura 1.9 mostra, nessa classe de tubos, as coordenadas circunferencial (θ) e longitudinal (x), a resultante de esforço cortante (Q_x), perpendicular à coordenada longitudinal (x), as resultantes de tensão normal circunferencial (N_θ) e longitudinal (N_x), e de momento fletor circunferencial (M_θ) e longitudinal (M_x), bem como os deslocamentos, radial (w) e longitudinal (u), e a rotação (β), em que todas estas grandezas estão mostradas em relação ao eixo de coordenada longitudinal (x).

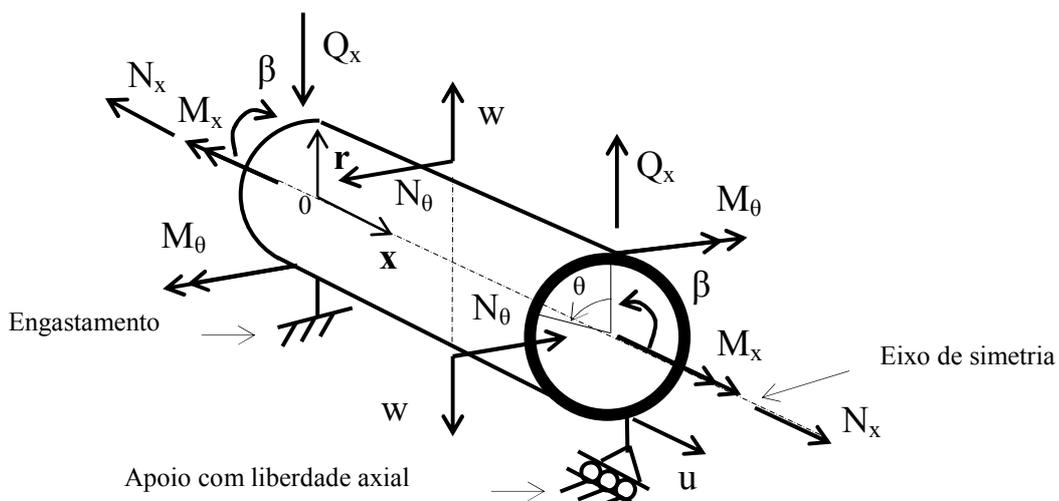


Figura 1.9 – Representação de resultantes de esforços e deslocamentos num cilindro de parede fina engastado numa extremidade e na outra, apoiado com liberdade axial

Mesmo que as pressões hidrostáticas internas uniformes, que serão as cargas consideradas neste trabalho, permitam simplificações nos resultados das análises, é apropriado entrar em discussões de cascas com resistência à flexão, e não se restringir somente à Teoria da Membrana, a qual despreza os momentos fletores. As soluções obtidas por procedimento analítico deste trabalho, com pressão interna uniformemente distribuída, são derivadas da teoria de Reissner para temperatura constante (Kraus, 1967).

Neste trabalho, foram analisados compósitos poliméricos cujos processos de fabricação, como também as propriedades físicas, mecânicas e térmicas, são satisfatórios na aplicação de reparos em tubulações e dutos de PVC e de alumínio. Para os reparos compósitos, neste trabalho, a matriz é formada de uma resina termofixa e a fase dispersa por um componente denominada reforço. Os materiais compósitos considerados neste trabalho serão os reforçados com fibra de vidro (RFV) e de carbono (RFC), com matriz epóxi, e também os de matrizes epóxi (E) e poliéster (P) com carga inerte de algodão. Será mostrado, no desenvolvimento para reparo em tubo polimérico, que o compósito de matriz epóxi reforçada com fibra RFV, em especial, cria uma nova metodologia.

Todos os métodos de reparo deverão ser capazes de trabalhar até 60 °C para garantir segurança (AEA, 2001). Os métodos propostos de reparo em tubos poliméricos para pressões de até 5 MPa, neste trabalho, utilizam as resinas curadas a frio, i.e. com valores de temperatura ambiente entre 20 °C e 27 °C, que validam os experimentos quanto ao material polimérico do tubo (Albuquerque, 1990) quanto às resinas epóxi e poliéster, conforme as normas técnicas (AEA, 2001).

É necessário, entretanto, acrescentar que os materiais poliméricos, mesmo em temperaturas próximas a 25 graus Celsius, apresentam viscoelasticidade. No caso de tubos plásticos, dependendo de fatores como processo de fabricação, características geométricas, e temperaturas de serviço (T) abaixo de T_g (temperatura de transição vítrea), podem reduzir este fenômeno. Ao longo deste trabalho serão testados tubos poliméricos, de PVC rígido, com $T_g = 80$ °C, na faixa de temperatura $T = 25$ °C \pm 0,5 °C e, i.e., $T < T_g$. Os ensaios serão simulados usando-se modelos teóricos, analíticos e numéricos, baseados na teoria de tubos de parede fina. Essas simulações serão comparadas com os resultados experimentais.

1.7 – DESCRIÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, será apresentada breve revisão do programa de elementos finitos utilizado, COMPSHELL (Mistry, 1981), baseado na Teoria de Cascas Cilíndricas de Parede Fina (Novozhilov, 1959). No mesmo capítulo será apresentado o modelo que será utilizado para o fenômeno da viscoelasticidade em tubos poliméricos. Ao final do capítulo, se mostrará a micromecânica de laminados compósitos.

Após a revisão de literatura, será mostrada a metodologia de reparo compósito utilizada no capítulo 3. Para isto, serão descritos, detalhadamente, os três tipos de corpo de prova, TI, TD e TR. Os parâmetros geométricos desses corpos de prova serão medidos e

analisados criteriosamente. A instrumentação dos tubos foi realizada com extensômetros, tipos roseta e unidirecionais, ligados ao equipamento de aquisição de dados de 16 canais da marca Lynx. Serão mostrados os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios experimentais.

Depois, serão mostrados os resultados numéricos e experimentais no capítulo 4, para os deslocamentos e esforços, através do programa COMPSHELL. Além disso, serão mostrados os resultados analíticos para as deformações viscoelásticas comparados com os experimentos.

A análise e discussão dos resultados estão no capítulo 5 das soluções analíticas de Kraus, numéricas do COMPSHELL, bem como as soluções analíticas, segundo o modelo de Birger, e as experimentais, por meio de três tipos de corpos de prova: tubo íntegro (TI), tubo desbastado (TD) e tubo reparado (TR). No capítulo 6, a conclusão será indicando o melhor reparo compósito, nas condições propostas neste trabalho. Ao final, serão dadas sugestões para futuras pesquisas para reparos compostos em tubos poliméricos, além dos de PVC, e de alumínio.

2 - MODELAMENTO MATEMÁTICO PARA TUBOS E REPAROS

2.1 – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Neste trabalho, serão apresentadas soluções analíticas e numéricas para tubulações cilíndricas de parede fina, as quais possuem a razão do raio (R) pela espessura (t) maior ou igual a dez, ou seja, $R/t \geq 10$, submetidas a pressões hidrostáticas internas (p), sem desprezar os momentos fletores meridionais e circunferenciais. Na subseção 2.2, são mostradas as soluções pela Teoria Elástica de Cascas Delgadas, evidenciando as principais manipulações algébricas. E, ainda na mesma subseção, devido ao fenômeno da viscoelasticidade em tubos poliméricos, foi acrescentado às soluções analíticas, o modelo de Burger, citado na literatura (Crawford, 1998). Adicionalmente, são apresentadas considerações sobre o método dos elementos finitos e as equações básicas da teoria macromecânica de lâminas e laminados.

2.2 - SOLUÇÕES ANALÍTICAS

2.2.1 – Soluções pela Teoria Elástica de Cascas Delgadas

Ao visualizar a Figura 1.9, do capítulo de introdução, é necessário notar que as coordenadas longitudinal, $x = \varphi$ e a circunferencial, $\theta = y$ foram ajustadas para o formato de cascas cilíndricas delgadas. Entretanto, a Teoria de Cascas de Parede Fina concebe outros formatos de cascas, além das cilíndricas, por exemplo, dentre elas, esféricas e elipsoidais, onde as coordenadas curvilíneas ortogonais entre si, a meridional, $\varphi = x$, e a circunferencial, $\theta = y$, com dois raios de curvatura, r_φ e r_θ , respectivamente, mostram-se apropriadas para descrever os esforços e deslocamentos, em quaisquer cascas de revolução. A Figura 2.1 apresenta, além das coordenadas curvilíneas e os raios de curvatura anteriormente definidos, a resultante de esforço cortante, Q_φ , perpendicular à coordenada φ ; as resultantes de tensões normais, circunferencial, N_θ , e meridional, N_φ , e de resultantes de momentos fletores, circunferencial, M_θ , e meridional, M_φ ; bem como os deslocamentos radial, w , e longitudinal, u , e a rotação, β , em relação ao eixo de coordenada φ . Lembrando-se que as tensões de cisalhamento, $N_{\varphi\theta} = N_{\theta\varphi} = 0$, e ainda os momentos torçores, $M_{\varphi\theta} = M_{\theta\varphi} = 0$, que também estão ilustrados na Figura 2.1, serão nulos em função

de a única solicitação ser a pressão uniforme interna (p). As definições de variáveis, que são mostradas na solução analítica de cilindros circulares da Teoria de Cascas Delgadas (Kraus, 1967), são as mesmas dadas pela simulação numérica do programa COMPSHELL (Mistry, 1994). Desta maneira, poderá a solução analítica ser comparada com a simulação numérica.

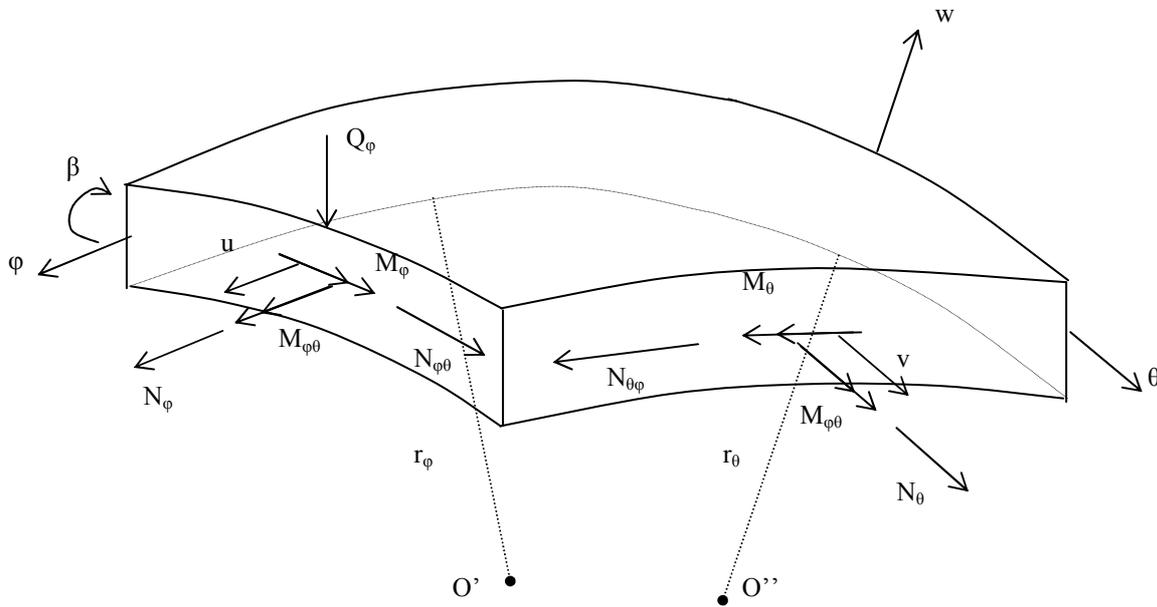


Figura 2.1 - Representação de esforços resultantes e de deslocamentos, coordenadas principais, raios de curvatura, em um elemento de casca de revolução

A partir deste ponto, serão apresentadas as equações para os esforços resultantes e deslocamentos, utilizando o sistema de coordenadas, φ e θ , da teoria geral de cascas finas de revolução, que ao final das deduções, serão simplificados para as coordenadas de cascas cilíndricas delgadas. Isto se faz necessário, para se obterem os resultados analíticos referentes aos tubos íntegros, e compará-los com os da simulação numérica realizada no programa COMPSHELL.

A primeira equação, de Reissner, é obtida pela substituição das equações 2.1 e 2.2 dos momentos fletores, M_φ e M_θ , em função de β , na primeira equação de equilíbrio estático, 2.4, que se apresenta em função de M_φ e M_θ (Kraus, 1967).

$$M_{\varphi} = D_{\varphi} \left(\frac{1}{r_{\varphi}} \frac{d\beta}{d\varphi} + \frac{v_{\varphi\theta}}{r_{\theta}} \beta \cot \varphi \right), \quad (2.1)$$

$$M_{\theta} = D_{\theta} \left(\frac{1}{r_{\theta}} \beta \cot \varphi + \frac{v_{\varphi\theta}}{r_{\varphi}} \frac{d\beta}{d\varphi} \right), \quad (2.2)$$

$$\text{Onde } \{D_{\varphi}, D_{\theta}\} = \{E_{\varphi}, E_{\theta}\} t^3 / 12(1 - v_{\varphi\theta} v_{\theta\varphi}), \quad (2.3)$$

$$\frac{d}{d\varphi} (rM_{\varphi}) - M_{\theta} r_{\varphi} \cos \varphi - r r_{\varphi} Q_{\varphi} = 0. \quad (2.4)$$

Onde E_{φ} e E_{θ} são os módulos de Young, nas duas coordenadas curvilíneas principais, ou seja, φ , a meridional, e, θ , a circunferencial; r_{φ} e r_{θ} são os raios de curvatura das coordenadas principais, φ e θ , respectivamente; t é a espessura da casca; $v_{\varphi\theta}$ e $v_{\theta\varphi}$ são os coeficientes de Poisson, ou seja, cada um é dado pela razão, de sinal negativo, entre a deformação na direção perpendicular, definida pelo 2º índice, e a deformação na direção da tensão normal aplicada, definida pelo 1º índice; D_{φ} e D_{θ} são coeficientes dos momentos M_{φ} e M_{θ} , que se apresentam em função dos módulos de Young, E_{φ} e E_{θ} , da espessura, t , e dos coeficientes de Poisson, $v_{\varphi\theta}$ e $v_{\theta\varphi}$. Deve-se acrescentar ainda que $r = r_{\theta} \sin \varphi$, e considerar que todas as variáveis geométricas são independentes de θ .

Fazendo as derivadas, depois das substituições dos momentos fletores, M_{φ} e M_{θ} , na equação 2.4, e algumas operações algébricas para que a equação diferencial resultante relacione β com Q_{φ} , obtém-se a primeira das equações de Reissner desejada (Kraus, 1967):

$$\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \frac{d^2\beta}{d\varphi^2} + \left[\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \cot \varphi + \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \right) + \frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \frac{1}{D_{\varphi}} \frac{dD_{\varphi}}{d\varphi} \right] \frac{d\beta}{d\varphi} - \left(\frac{r_{\varphi} D_{\theta}}{r_{\theta} D_{\varphi}} \cot^2 \varphi + v_{\varphi\theta} - v_{\varphi\theta} \frac{1}{D_{\varphi}} \frac{dD_{\varphi}}{d\varphi} \right) \beta = \frac{r_{\varphi} (r_{\theta} Q_{\varphi})}{D_{\varphi}}. \quad (2.5)$$

Existe uma relação entre as resultantes de tensão, N_{φ} e N_{θ} , e os deslocamentos longitudinal e radial, u e w , respectivamente, dadas pelas equações 2.6 e 2.7. Deve-se mencionar a relação da rotação β com os deslocamentos, u e w , que é dada pela equação 2.8, explicitada a seguir:

$$\frac{du}{d\varphi} - u \cot \varphi = \frac{N_{\varphi}}{E_{\varphi} t} (r_{\varphi} + v_{\theta\varphi} r_{\theta}) - \frac{N_{\theta}}{E_{\theta} t} (r_{\theta} + v_{\varphi\theta} r_{\varphi}), \quad (2.6)$$

$$w + u \cot \varphi = \frac{r_{\theta}}{E_{\theta} t} (N_{\theta} - v_{\varphi\theta} N_{\varphi}), \quad (2.7)$$

$$\beta = \frac{1}{r_{\varphi}} \left(u - \frac{dw}{d\varphi} \right). \quad (2.8)$$

A segunda equação de Reissner é obtida, derivando-se a equação 2.7 em relação à φ . Depois de tomar a equação 2.6, multiplicá-la por $\cot \varphi$, subtrai-se do resultado da derivação de 2.7, e assim, da equação 2.8 se obtém a equação desejada (Kraus, 1967):

$$r_\varphi \beta = F(\varphi) \cot \varphi - \frac{d}{d\varphi} \left[\frac{r_\theta}{E_\theta t} (N_\theta - \nu_{\varphi\theta} N_\varphi) \right], \quad (2.9)$$

$$F(\varphi) = \frac{N_\varphi}{E_\theta t} (r_\varphi + \nu_{\theta\varphi} r_\theta) - \frac{N_\theta}{E_\theta t} (r_\theta + \nu_{\varphi\theta} r_\varphi). \quad (2.10)$$

A equação 2.9 deve ser rescrita, substituindo N_θ e N_φ em função de Q_φ . Para fazer isso, o primeiro passo é evidenciar N_θ na segunda equação de equilíbrio, dada por 2.11, onde N_θ e N_φ se relacionam com Q_φ .

$$r_\varphi N_\theta = \frac{1}{\text{sen}\varphi} \left[\frac{d(rQ_\varphi)}{d\varphi} - \frac{N_\varphi}{r_\varphi} r r_\varphi - r r_\varphi q \right]. \quad (2.11)$$

A terceira equação de equilíbrio, 2.12, relaciona N_θ e N_φ com Q_φ , e é dada por:

$$\frac{d(rN_\varphi)}{d\varphi} - r_\varphi N_\theta \cos \varphi + rQ_\varphi + r r_\varphi q_\varphi = 0. \quad (2.12)$$

Para se conseguir a equação 2.13, onde N_φ é expresso em função de Q_φ , deve-se substituir a equação 2.11 na equação 2.12, após algumas manipulações com as propriedades de derivação e integração, e operações algébricas, finalmente se obtêm:

$$N_\varphi = Q_\varphi \cot \varphi - F_1(\varphi), \quad (2.13)$$

$$F_1(\varphi) = \frac{1}{r \text{sen}\varphi} \left[C_1 + \int_{\varphi_0}^{\varphi} (q \cos \varphi + q_\varphi \text{sen}\varphi) r r_\varphi d\varphi \right]. \quad (2.14)$$

Lembrando que se deve evidenciar N_θ na equação 2.11, usando propriedades de derivação e manipulações algébricas, resultando em:

$$N_{\theta} = \frac{1}{r_{\varphi}} \frac{d(r_{\theta} Q_{\varphi})}{d\varphi} + \frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} F_1(\varphi) - r_{\theta} q . \quad (2.15)$$

As equações 2.13 e 2.15, de N_{φ} e N_{θ} , respectivamente, são substituídas na segunda equação de Reissner dada por 2.9. Para reescrevê-la, aplicaram-se as propriedades de derivação e ajustes algébricos resultando em (Kraus, 1967):

$$\begin{aligned} & \frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \frac{d^2(r_{\theta} Q_{\varphi})}{d\varphi^2} + \left[\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \cot \varphi + \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \right) - \frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} \frac{d(E_{\theta} t)}{d\varphi} \right] \frac{d(r_{\theta} Q_{\varphi})}{d\varphi} - \\ & - \left[\frac{E_{\theta}}{E_{\varphi}} \frac{r_{\varphi}}{r_{\theta}} \cot^2 \varphi - \nu_{\varphi\theta} - \frac{\nu_{\varphi\theta} \cot \varphi}{E_{\theta} h} \frac{d(E_{\theta} t)}{d\varphi} \right] (r_{\theta} Q_{\varphi}) = -E_{\theta} \text{tr}_{\varphi} \beta + G(\varphi), \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} G(\varphi) = & - \frac{d}{d\varphi} \left[\frac{r_{\theta}^2}{r_{\varphi}} F_1(\varphi) - \nu_{\varphi\theta} r_{\theta} F_1(\varphi) - r_{\theta}^2 q \right] + \left[\frac{r_{\theta}^2}{r_{\varphi}} F_1(\varphi) + \nu_{\varphi\theta} r_{\theta} F_1(\varphi) - q r_{\theta}^2 \right] \frac{1}{(E_{\theta} t)} \frac{d(E_{\theta} t)}{d\varphi} - \\ & - \cot \varphi \left[\frac{E_{\theta}}{E_{\varphi}} (r_{\varphi} + \nu_{\varphi\theta} r_{\theta}) F_1(\varphi) + (r_{\theta} + \nu_{\varphi\theta} r_{\varphi}) \left(\frac{r_{\theta}}{r_{\varphi}} F_1(\varphi) - r_{\theta} q \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Para ilustrar a solução das duas equações diferenciais de Reissner dadas por 2.5 e 2.16, consideram-se cascas de revolução, ortotrópicas, em que as propriedades físicas e mecânicas para as cascas consideradas neste trabalho são idênticas. A espessura é função da posição meridional, φ , mas as propriedades elásticas são independentes de φ . Em primeiro lugar, definem-se as novas variáveis, U e W , dependentes de Q_{φ} e β , respectivamente. As variáveis U e W têm dimensões de momento de uma força e de área, respectivamente. Entretanto, não serão analisadas quanto ao significado físico, pois elas apenas auxiliam nas soluções das equações diferenciais e não constarão no final das deduções, apresentando-se assim:

$$U = r_{\theta} Q_{\varphi} \quad \text{e} \quad W = t^2 \beta . \quad (2.18)$$

Pelas considerações em relação às propriedades elásticas, pode-se derivar D_{φ} , E_{θ} e t , em relação à posição meridional φ , que resulta em:

$$\frac{1}{D_\varphi} \frac{dD_\varphi}{d\varphi} = \frac{3}{t} \frac{dt}{d\varphi}, \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{E_\theta t} \frac{d(E_\theta t)}{d\varphi} = \frac{1}{t} \frac{dt}{d\varphi}. \quad (2.20)$$

As duas equações de Reissner, dadas por 2.5 e 2.16 ao serem substituídas pelas variáveis, U e W, assumem novos formatos nas equações 2.21a e 2.22b, que são mais conhecidos na resolução de equações diferenciais, dadas por:

$$L(W) - 2f(\varphi)W = 12(1 - \nu_{\varphi\theta} \nu_{\theta\varphi}) \frac{U}{E_\varphi}, \quad (2.21a)$$

$$L(U) = -E_\theta W + G_1(\varphi). \quad (2.21b)$$

Onde os operadores diferenciais são definidos como (Kraus, 1967):

$$L(\dots) = \frac{\nu_{\varphi\theta} t}{r_\varphi} \frac{d^2(\dots)}{d\varphi^2} + \left[\frac{r_\theta t}{r_\varphi^2} \cot\varphi + \frac{t}{r_\varphi} \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r_\theta}{r_\varphi} \right) - \frac{r_\theta}{r_\varphi^2} \frac{dt}{d\varphi} \right] \frac{d(\dots)}{d\varphi} - \left[\frac{E_\theta t}{r_\theta E_\varphi} \cot^2\varphi - \nu_{\varphi\theta} \frac{t}{r_\varphi} - \frac{\nu_{\varphi\theta} \cot\varphi}{r_\varphi} \frac{dt}{d\varphi} \right] (\dots), \quad (2.21c)$$

$$f(\varphi) = \frac{\nu_{\varphi\theta} t}{r_\varphi} + \left[\frac{r_\theta}{r_\varphi} \cot\varphi + \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r_\theta}{r_\varphi} \right) - \nu_{\varphi\theta} \cot\varphi \right] \frac{1}{r_\theta} \frac{dt}{d\varphi} + \frac{r_\theta}{r_\varphi^2} \frac{d^2 t}{d\varphi^2}, \quad (2.21d)$$

$$G_1(\varphi) = \frac{t}{r_\varphi} G(\varphi). \quad (2.21e)$$

Fazendo uma nova aplicação do operador L, em 2.21a e 2.21b, e manipulando-as, chega-se a duas equações diferenciais de quarta ordem, 2.22a e 2.22b, em função das variáveis, U e W, respectivamente já mencionadas, dadas por:

$$LL(U) - 2fL(U) + 12(1 - \nu_{\varphi\theta} \nu_{\theta\varphi}) \frac{E_\theta}{E_\varphi} U = L(G_1) - 2G_1 f, \quad (2.22a)$$

$$LL(W) - 2L(fW) + 12(1 - \nu_{\varphi\theta} \nu_{\theta\varphi}) \frac{E_\theta}{E_\varphi} W = \frac{G_1 t^3}{D_\varphi}. \quad (2.22b)$$

As equações 2.22a e 2.22b podem ser resolvidas para cada uma das variáveis dependentes, U e W, respectivamente. Assim, escolhendo um formato apropriado para a equação 2.22a, em função de U, ao final da resolução dela, ter-se-á também, de adotar o mesmo procedimento para a solução da equação 2.22b. Assim procedendo, obtêm-se as soluções representadas por:

$$U = U_h + U_p , \quad (2.22c)$$

$$W = W_h + W_p . \quad (2.22d)$$

Onde os índices “h” e “p”, nas equações 2.22c e 2.22d, referem-se às soluções da equação homogênea e da equação particular, respectivamente. É interessante acrescentar, que a solução homogênea é usada para satisfazer às condições de contorno, enquanto a solução particular é aproveitada, considerando o termo de carregamento distribuído. É importante discutir as duas soluções separadamente. O primeiro foco será na solução homogênea da equação 2.22a ou 2.22b, e mais tarde, a solução particular para situação de carregamento de cascas cilíndricas.

Pode-se separar uma das equações homogêneas de quarta ordem das equações 2.22a ou 2.22b, em duas equações homogêneas de segunda ordem. Para determinar essas condições, assume-se que a separação é possível, e então, a solução da primeira das equações homogêneas de 2.22a também satisfaz a equação:

$$L(U_h) + \lambda^2 U_h = 0 . \quad (2.22e)$$

Onde λ é um parâmetro constante, a ser determinado. Aplicando o operador L novamente na equação 2.22e, tem-se:

$$LL(U_h) = -\lambda^2 L(U_h) = \lambda^4 U_h . \quad (2.22f)$$

A partir da equação 2.22c, a primeira das equações de Reissner, 2.22a, desconsiderando a solução trivial $U_h = 0$, reduz-se a:

$$\lambda^4 + 2\lambda^2 f + 12 \left(1 - \nu_{\varphi\theta} \nu_{\theta\varphi}\right) \frac{E_\theta}{E_\varphi} = 0 . \quad (2.22g)$$

O primeiro e o terceiro termos da equação 2.22g são constantes, então o colchete da equação 2.21d só se anula, se $f(\varphi)$ é constante, e daí passa a ser escrita por:

$$f(\varphi) = \frac{v_{\varphi\theta} t}{r_\varphi} + \left[\left(\frac{r_\theta}{r_\varphi} - v_{\varphi\theta} \right) \cot \varphi + \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{r_\theta}{r_\varphi} \right) \right] \frac{1}{r_\varphi} \frac{dt}{d\varphi} + \frac{r_\theta}{r_\varphi^2} \frac{d^2 t}{d\varphi^2} = \text{constante} . \quad (2.22h)$$

É mais conveniente escrever as equações, doravante, em função de x , ao longo da geratriz da casca, do que em função de φ . Fazendo a mudança de variável $dx = r_\varphi d\varphi$, o critério de separação se torna:

$$f(x) = \frac{v_{\varphi\theta} t}{r_\varphi} + \left[\left(\frac{r_\theta}{r_\varphi} - v_{\varphi\theta} \right) \cot \varphi + \frac{dr_\theta}{dx} - \frac{r_\theta}{r_\varphi} \frac{dr_\varphi}{dx} \right] \frac{dt}{dx} + r_\theta \frac{d^2 t}{dx^2} = \text{constante} . \quad (2.22i)$$

No caso de cascas cilíndricas circulares, tem-se $r_\theta = R$, $r_\varphi \rightarrow \infty$ e $\varphi = \pi/2$. Então, a equação 2.22i se reduz a:

$$f(x) = R \frac{d^2 t}{dx^2} = \text{constante} . \quad (2.22j)$$

2.2.1.1 - Solução para cascas cilíndricas com pressão interna uniforme

Neste caso, a espessura, t , e as propriedades elásticas são independentes da posição longitudinal, x . Ao resolver a equação 2.22g, nota-se que t/r_φ é da mesma ordem de grandeza de f , e assume-se também, que E_θ e E_φ são, entre si, da mesma ordem de grandeza. Então, por se tratar de cascas cilíndricas circulares, as soluções λ_1^2 e λ_2^2 são complexas conjugadas, e $i = \sqrt{-1}$, que resultam em:

$$\lambda_1^2 = \bar{\lambda}_2^2 = \lambda^2 = -f + i \left[12(1 - v_{\varphi\theta} v_{\theta\varphi}) \frac{E_\theta}{E_\varphi} - f^2 \right]^{1/2} . \quad (2.23)$$

Fazendo a mudança apropriada do subscrito “ φ ” para “ x ”, os operadores L e $f(x)$, e ainda λ^2 , dadas por 2.21c, 2.22j e 2.23 se reduzem a:

$$L(\dots) = tR \frac{d^2}{dx^2}(\dots) \quad \text{e} \quad f(x) = 0, \quad (2.24a)$$

$$\lambda^2 = 2i\mu^2 \quad \text{e} \quad \mu^2 = \left[3 \frac{E_\varphi}{E_\theta} \frac{(1 - \nu_{x\theta} \nu_{\theta x})}{R^2 t^2} \right]^{1/2}. \quad (2.24b)$$

As resultantes de tensões, $N_x = N_\varphi$ e N_θ , as resultantes de momentos, M_x e M_θ , e os deslocamentos, u e w , em cascas cilíndricas circulares são dadas pelas equações 2.25a, 2.25b, 2.25c e 2.25d:

$$N_x = -F_1(x) \quad \text{e} \quad N_\theta = R \left(\frac{dQ_x}{dx} - q \right), \quad (2.25a)$$

$$M_x = D_x \left(\frac{d\beta}{dx} \right) \quad \text{e} \quad M_\theta = D_\theta \left(\nu_{\theta x} \frac{d\beta}{dx} \right), \quad (2.25b)$$

$$F(x) = \frac{N_x - \nu_{x\theta} N_\theta}{E_x t} \quad \text{e} \quad F_1(x) = C_1 + \int_{x_0}^x q_x dx, \quad (2.25c)$$

$$u = \int_{x_0}^x F_1(x) dx \quad \text{e} \quad w = \frac{R(N_\theta - \nu_{x\theta} N_x)}{E_x t}. \quad (2.25d)$$

É preciso lembrar que o índice “ φ ” foi substituído por “ x ”, daí o esforço cortante passa a ser Q_x e a rotação, β , que são dados por:

$$Q_x = Q_x^p + Q_x^h, \quad (2.25e)$$

$$\beta = \beta^p + \beta^h. \quad (2.25f)$$

2.2.1.2 – Solução para tubo íntegro biengastado com pressão hidrostática interna

Para se obterem os resultados da solução analítica de cascas cilíndricas de parede fina, e depois, fazer a comparação com a solução numérica fornecida pelo programa COMPSHELL, vai se modelar essa casca cilíndrica, como um tubo longo ($L/R \geq 4$), com duas tampas nas extremidades, sendo inicialmente, ambas engastadas. A Figura 2.2 mostra uma casca cilíndrica circular engastada nas bordas, chamada de tubo biengastado, submetido à pressão hidrostática interna, distribuída uniformemente, p , de comprimento, L ,

de espessura, t , e de raio, R , com essas variáveis geométricas constantes, bem como no eixo de simetria, a coordenada longitudinal, x , com a origem no centro da casca cilíndrica.

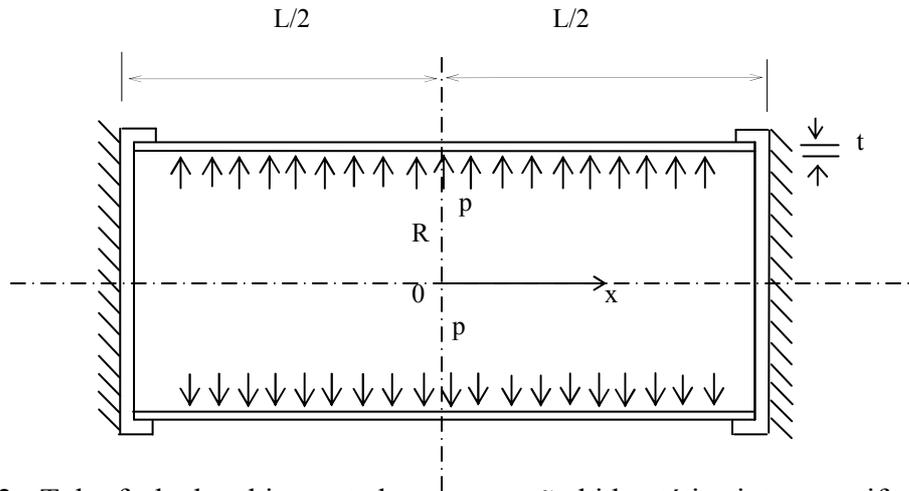


Figura 2.2 - Tubo fechado e biengastado com pressão hidrostática interna uniforme

Quando a pressão hidrostática interna for $q = -p$, constante, então as equações se reduzem ao caso da solução homogênea, que resulta em $Q_x^p = \beta^p = 0$. O efeito da pressão, entretanto, entra na solução geral utilizando as equações 2.22e, 2.24a, 2.24b, e 2.25e, obtendo-se:

$$Q_x = A_1 \cos \mu x \cosh \mu x + A_2 \operatorname{sen} \mu x \operatorname{senh} \mu x + A_3 \operatorname{sen} \mu x \cosh \mu x + A_4 \cos \mu x \operatorname{senh} \mu x, \quad (2.26a)$$

$$\beta = \frac{-1}{2\mu^2 D_x} (A_2 \cos \mu x \cosh \mu x - A_1 \operatorname{sen} \mu x \operatorname{senh} \mu x - A_4 \operatorname{sen} \mu x \cosh \mu x + A_3 \cos \mu x \operatorname{senh} \mu x). \quad (2.26b)$$

As condições de contorno para o tubo biengastado, considerando o centro do cilindro como a coordenada de origem, conforme a Figura 2.2, são dadas por:

$$w = \beta = 0, \text{ para } x = \pm L/2. \quad (2.27)$$

Fazendo as substituições, de N_x e de N_θ , na equação do deslocamento radial, w , dada por 2.25d, e ainda, substituindo $R^2/(E_\theta t) = 1/(4\mu^4 D_x)$, dada pela equação 2.3, e sabendo que, $C_1 = 0$ (forças axiais nulas) e $F_1(x) = 0$, a equação de w , na 2.25d modifica-se para:

$$w = \frac{1}{4\mu^4 D_x} \frac{dQ_x}{dx} + \frac{pR^2}{E_\theta t}. \quad (2.28)$$

Para se determinarem as constantes A_1, A_2, A_3 e A_4 da equação 2.26, devem-se utilizar as condições de contorno, dadas pela equação 2.27. A simetria das cargas e dos deslocamentos, em relação ao centro do cilindro, resulta em $A_1 = A_2 = 0$. As rotações, β , são anti-simétricas, em relação ao centro do cilindro, então, manipulando a equação 2.27 para $x=L/2$, definindo $\delta=\mu L/2$, obtém-se:

$$\{A_3, A_4\} = -4\mu^3 D_x \frac{pR^2}{E_\theta t} \frac{(\text{sen}\delta \cosh\delta, \cos\delta \text{senh}\delta)}{(\text{senh}\delta \cosh\delta + \text{sen}\delta \cos\delta)}. \quad (2.29)$$

Para finalizar, fazendo-se as manipulações necessárias pode-se obter $w, \beta, M_x = M_\varphi, M_\theta, N_\theta$ e Q_x . Sabendo-se que não há forças axiais, $C_1 = N_x = 0$, pode-se escrever o deslocamento w , a rotação β , momentos fletores M_x, M_θ , e tensão normal, N_θ , em função da posição x , obtendo-se, respectivamente:

$$w = \frac{pR^2}{E_\theta t} \left[1 - \frac{(\cosh\delta \text{sen}\delta + \cos\delta \text{senh}\delta) \cos\mu x \cosh\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} - \frac{(\cosh\delta \text{sen}\delta - \cos\delta \text{senh}\delta) \text{sen}\mu x \text{senh}\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} \right], \quad (30a)$$

$$\beta = -2\mu \frac{pR^2}{E_\theta t} \left[\frac{-\cosh\delta \text{sen}\delta \cos\mu x \text{senh}\mu x + \cos\delta \text{senh}\delta \text{sen}\mu x \cosh\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} \right], \quad (30b)$$

$$M_\varphi = M_x = -\frac{2\mu^2 D_x pR^2}{E_\theta t} \left[\frac{(\cosh\delta \text{sen}\delta + \cos\delta \text{senh}\delta) \text{sen}\mu x \text{senh}\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} + \frac{(\cos\delta \text{senh}\delta - \cosh\delta \text{sen}\delta) \cosh\mu x \cos\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} \right] \quad (30c)$$

$$Q_x = -4\mu^3 D_x \frac{pR^2}{E_\theta t} \left[\frac{\text{sen}\delta \cosh\delta \text{sen}\mu x \cosh\mu x + \cos\delta \text{senh}\delta \cos\mu x \text{senh}\mu x}{\text{sen}\delta \cos\delta + \cosh\delta \text{senh}\delta} \right], \quad (30d)$$

$$M_\theta = \nu_{x\theta} M_x \quad \text{e} \quad N_\theta = \frac{E_\theta t}{R} w. \quad (30e)$$

Nas figuras 2.3 e 2.4, mostram-se as curvas de distribuição, de deslocamento radial, w , e de resultante de momento longitudinal, M_x , respectivamente, em função da posição longitudinal x , para cascas cilíndricas isotrópicas biengastadas (vide Figura 2.2). No caso de tubos de PVC, $E_x = E_\theta = E = 3000$ MPa, $\nu_{x\theta} = \nu_{\theta x} = \nu = 0,4$, com raio (R) de 50 mm e espessura (t) de 1,8 mm, logo $R/t = 27,8$, e ainda, quatro comprimentos diferentes, 200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm, com as razões entre o comprimento (L) e o raio (R), de $L/R = 4, 6, 8$ e 10 . Neste caso, considerando a expressão de μ^2 da equação 2.24b, desprezando $\nu^2 = 0,16$, obtém-se $\mu = 6,94/R$ e $\delta = 3,47(L/R)$; assim o argumento das funções trigonométricas e hiperbólicas, $\mu x = (2\delta/L)x$, será substituído por $\delta(x/R)/(L/2R)$, portanto as abscissas das figuras 2.3 e 2.4, rodados em Matlab6.0 (Apêndice C), serão dadas pela grandeza adimensional, $(x/R)/(L/2R)$. Realmente, à medida que o comprimento da casca

crece, considerando constantes o raio e a espessura da casca, a solução da aproximação, de cascas cilíndricas de parede fina, tem uma progressiva região de aplicabilidade, onde o efeito das bordas é pequeno.

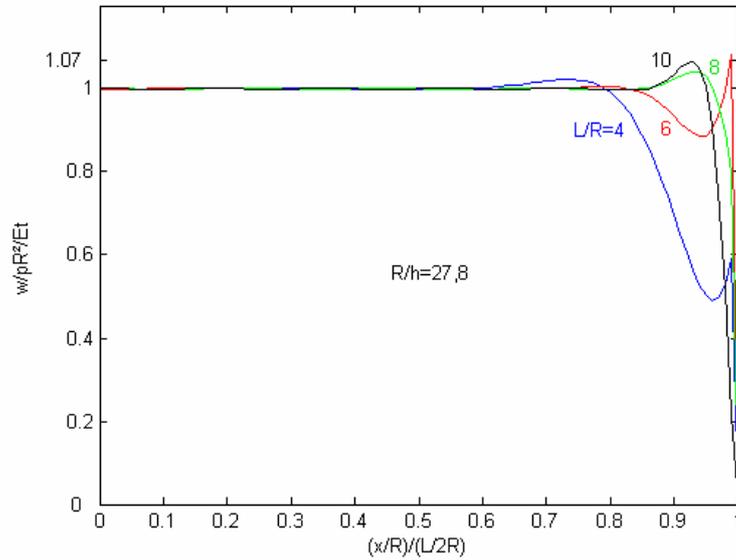


Figura 2.3 - Curvas de distribuição de deslocamento radial (w) em tubo íntegro biengastado de PVC, submetidos à mesma pressão hidrostática interna

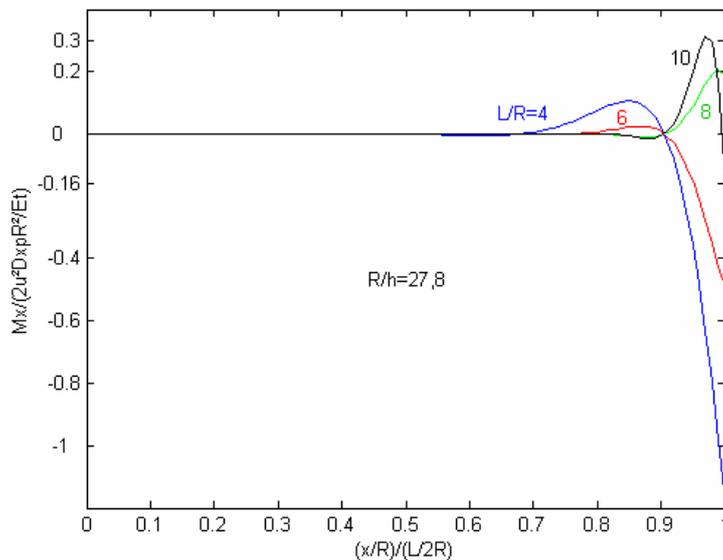


Figura 2.4 - Curvas de distribuição de resultante de momento longitudinal (M_x) em tubo íntegro biengastado de PVC, submetido à mesma pressão hidrostática interna

Outro exemplo, de tubo de alumínio biengastado, é mostrado nas figuras 2.5 e 2.6, por meio das curvas, de distribuição de deslocamento radial, w , e de resultante de tensão circunferencial, N_θ , respectivamente, em função da posição longitudinal x . Neste caso, $E_x = E_\theta = E = 70307 \text{ MPa}$, $\nu_{x\theta} = \nu_{\theta x} = \nu = 0,3$, com raio (R) de 50 mm e espessura (t) de 2,1 mm, logo $R/t = 23,8$, e ainda, quatro comprimentos diferentes, com os mesmos valores dos exemplos das figuras 2.3 e 2.4, com $L/R = 4, 6, 8$ e 10 . Assim, desprezando $\nu^2 = 0,11$, obtém-se $\mu = 6,42/R$ e $\delta = 3,21(L/R)$, onde o argumento das funções trigonométricas e hiperbólicas, $\mu x = (2\delta/L)x$, será substituído por $\delta(x/R)/(L/2R)$, portanto as abscissas das figuras 2.5 e 2.6, rodadas em Matlab6.0, serão dadas por $(x/R)/(L/2R)$.

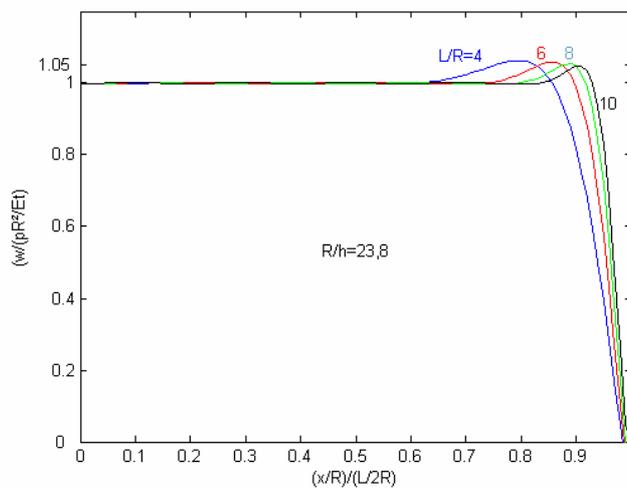


Figura 2.5 - Curvas de distribuição de deslocamento radial (w) de tubo íntegro biengastado de alumínio, submetidos à mesma pressão hidrostática interna

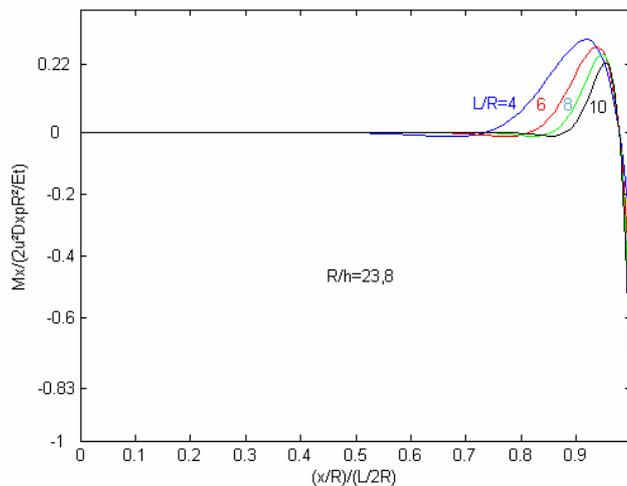


Figura 2.6 - Curvas de distribuição de resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo íntegro biengastado de alumínio, submetido à mesma pressão hidrostática interna

É importante mostrar que os resultados no meio da casca cilíndrica, na posição $x = 0$, são idênticos aos da Teoria de Membrana, quando se aumenta o comprimento, L , do tubo, as frações envolvendo funções trigonométricas e hiperbólicas dependentes de δ , no limite de $L \rightarrow \infty$, aproximam-se de zero, daí as equações 2.30a até 2.30e são reduzidas a:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \begin{Bmatrix} w(0) \\ \beta(0) \\ Q_x(0) \\ M_x(0) \\ N_x(0) \\ N_\theta(0) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} pR^2/E_0 t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ pR \end{Bmatrix} . \quad (2.31)$$

2.2.2 – Deformação viscoelástica de material plástico pelo modelo de Burger

Muitos modelos bem-sucedidos no estudo dos plásticos, reforçados ou não, foram baseados em associações de molas e amortecedores, que, respectivamente, representam o comportamento intermediário, elástico e viscoso, desses materiais (Christensen, 1998). A viscoelasticidade de um material plástico submetido a um carregamento mecânico apresenta uma parcela elástica, a qual é independente do tempo, e outra viscosa, a qual depende da fluência do mesmo. Neste estudo, o carregamento ocorre devido à pressurização interna do tubo. Entretanto, não é objetivo principal deste trabalho se aprofundar em modelos de viscoelasticidade, já que os tubos de PVC rígido investigados foram ensaiados na faixa de temperatura $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e apresentam temperatura de transição vítrea, $T_g = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Assim, de acordo com Crawford (1998), espera-se que a parcela viscosa da viscoelasticidade seja reduzida. Adicionalmente, para os trechos dos tubos de PVC, reparados com tecido de fibras vidro-E em matriz de resina epóxi, testadas neste trabalho, o efeito viscoso deve ser ainda menos significativo, em decorrência do fato de as fibras de vidro-E apresentarem comportamento linear e elástico em temperaturas próximas de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e mesmo bem mais elevadas (Crawford, 1998).

Nesta seção, será apresentado o modelo de Burger (ou “de quatro parâmetros”), no qual fenômeno da viscoelasticidade pode ser observado por meio do gráfico da deformação em função do tempo (Crawford, 1998). Os primeiros modelos criados com associação simples de uma mola e de um amortecedor foram: (i) em série - modelo de Maxwell e (ii) em paralelo - modelo de Voigt (Gandur, 2001). Os modelos de viscoelasticidade, em geral,

podem ser associados aos ensaios de retardação e de relaxação. Para entender a escolha do modelo de Burger, visualizado na Figura 2.7, que é constituído da associação em série do conjunto de elementos dos modelos de Maxwell e de Voigt (ou de Kelvin), precisa-se ter em conta, que cada um destes últimos sozinho falha na descrição rigorosa do que ocorre com a deformação dependente do tempo, sendo o primeiro no ensaio de relaxação, e o segundo, no de retardação (Gandur, 2001). Na Figura 2.7, é mostrada a tensão unidirecional dependente do tempo, $\sigma(t)$, as constantes das molas, ξ_1 e ξ_2 , análogas aos módulos de Young, e as constantes dos amortecedores, η_1 e η_2 , às viscosidades, representando cada estado de transição, do vítreo para o borrachoso (Gandur, 2001). Em termos de modelamento matemático, o ensaio de retardação corresponde a manter a pressão interna constante no tubo. Portanto, as tensões na direção longitudinal e na circunferencial, permanecem inalteradas. Dessa forma se escreverá uma equação particular da deformação em função do tempo. O ensaio de relaxação, realizado após a etapa de retardação, associa-se com o alívio da pressão, quando a taxa de variação da deformação em relação ao tempo já é praticamente nula. No modelamento, partindo-se da equação geral proposta por Crawford (1998), chega-se a uma equação da deformação em função do tempo.

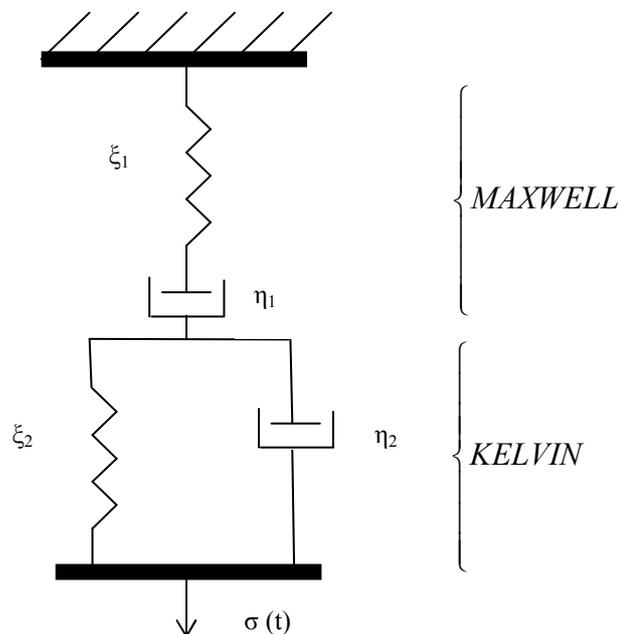


Figura 2.7 – Representação do modelo de Burger (Crawford, 1998)

A equação geral da deformação unidirecional dependente do tempo do modelo de Burger é dada por (Crawford, 1998):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{\xi_1} + \frac{\sigma(t)}{\eta_1} t + \frac{\sigma(t)}{\xi_2} \left[1 - e^{-\frac{\xi_2}{\eta_2} t} \right] \quad (2.32)$$

A derivada da deformação em relação ao tempo a partir da equação 2.32, considerando $\sigma(t) = \sigma_0$, durante o intervalo de tempo em que a pressão for constante, é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_2} e^{-\frac{\xi_2}{\eta_2} t} \quad (2.33)$$

Logo, as constantes ξ_1 e η_1 são determinadas do gráfico da deformação em função do tempo no ensaio de retardação no trecho mais estável da curva onde a deformação cresce linearmente com o tempo. E ξ_2 e η_2 podem ser determinadas no trecho em que a deformação cresce rapidamente no início do ensaio, e, desta forma, são dadas por:

$$\xi_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_1} \quad (2.34)$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma_0}{\dot{\varepsilon}} \quad (2.35)$$

$$\xi_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_2} \quad (2.36)$$

$$\eta_2 = \frac{\xi_2 t}{\ln \left[\frac{1}{1 + \frac{\xi_2}{\xi_1} + \frac{\xi_2}{\eta_1} t - \frac{\xi_2}{\sigma_0} \varepsilon(t)} \right]} \quad (2.37)$$

2.3 - SOLUÇÕES NUMÉRICAS

2.3.1 – Método dos elementos finitos

Os problemas teóricos de cascas de revolução, com características geométricas simples, podem ser resolvidos pelo método de equações diferenciais, que já foi mostrado na seção anterior, envolvendo solução geral e a particular, com as condições iniciais e de contorno bem definidas. Entretanto, existem situações reais em Engenharia, que não possibilitam soluções analíticas, devido à complexidade, ou ainda, à dificuldade de se lidar com as condições iniciais ou de contorno. Nestes casos, deve-se partir para soluções numéricas, que darão resultados aproximados, em que o “método dos elementos finitos” é o mais indicado (Moaveni, 1999).

O método de elementos finitos (MEF) surgiu no início do século 20, por meio da utilização de elementos discretizados na modelagem de estruturas. Muitos pesquisadores atribuem a R. Courant, ser o primeiro a desenvolver o MEF, por meio de um artigo científico, no qual ele utilizou elementos discretos triangulares num problema de torção. Contudo, foi a contribuição de trabalhos científicos de diversas instituições de pesquisa que tornou este método universalmente aceito (Monaghan, 2001). Em 1953, já bem sofisticado, o MEF envolvia a resolução de problemas teóricos por métodos matriciais, a discretização das estruturas em elementos finitos e o método dos deslocamentos. Isto fez com que se produzissem estruturas mais resistentes e leves na indústria aeronáutica e na construção civil. Para citar um exemplo, a companhia Boeing, no início da década de 50, foi a primeira a utilizar o MEF em modelagem de estrutura de asas para aeronaves (Maia, 2003). Finalmente, em 1960, após o estudo sobre asas de aeronaves, avaliou-se a estrutura integral da asa, como resultante da contribuição e compatibilidade de elementos diversos, cujo conjunto formava componentes estruturais discretos. O MEF pode ser aplicado, dentre outras situações, em análise de sistemas dinâmicos ou estáticos, com esforços lineares ou não-lineares.

As soluções de problemas em Engenharia exigem uma estratégia de abordagem que começa na identificação do problema real, perpassa pela modelagem e conhecimento de relações matemáticas aplicáveis ao modelo, metodologia de solução das equações e, ao final, a interpretação dos resultados, em função das expectativas de coerência entre o modelo proposto e o problema real. O método numérico é um procedimento aproximado que pode ser aplicado, em caráter geral, para estruturas complexas. A limitação, nas soluções de problemas reais, traz a idéia de subdividir a estrutura global em componentes individuais, chamados de elementos, conectados entre si por nós. A partir do comportamento mecânico de cada elemento, é possível compreender o comportamento da estrutura global. Nos problemas reais, os sistemas estruturais se apresentam contínuos e,

geralmente, com uma quantidade de apoios específicos para cada situação. O MEF simula a estrutura como uma montagem de elementos que têm um comprimento finito, e não diferencial, como no caso de soluções analíticas. O método geral de sistemas discretos é visualizado pela Figura 2.8.

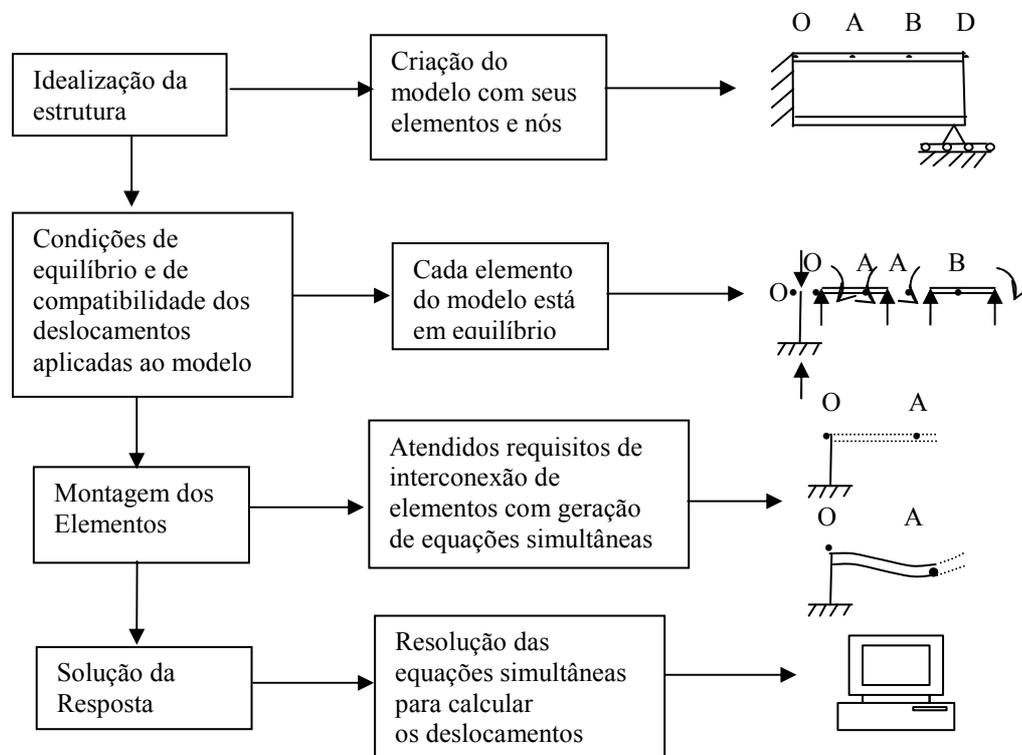


Figura 2.8 - Esquema do método geral para análise de sistemas discretos (Alves Filho, 2000)

O sistema de equações algébricas geradas a partir da discretização de estruturas que utilizam as condições de equilíbrio e compatibilidade de deslocamentos dos elementos aumenta, quando o problema se torna mais complexo. Para dar solução numérica a um grande número de equações, é necessário armazenar essas informações e processá-las por intermédio de notação matricial, com auxílio de computador. É importante notar, que a teoria matricial é usada no MEF, por uma questão apenas organizacional; desta forma, neste trabalho, só será apresentada a descrição das equações matriciais utilizadas nas simulações. Existe uma seqüência de passos que o MEF propõe, para o planejamento da solução de problemas complexos. Os principais passos, ilustradas na Figura 2.9, envolvem três tarefas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (Alves Filho, 2000). Antes de realizar qualquer cálculo, na primeira tarefa, deve-se montar o modelo discretizado da estrutura a ser analisada, e nele aplicar as condições de contorno, ao que se chama de pré-processamento. Depois, no processamento, fazendo a segunda tarefa, são

efetuados os cálculos matriciais, para determinação de deslocamentos e esforços nos elementos. Na terceira tarefa, finalmente, são interpretados os resultados e é feita a verificação de sua coerência com o problema físico real, o que será realizado no capítulo de análise dos resultados.

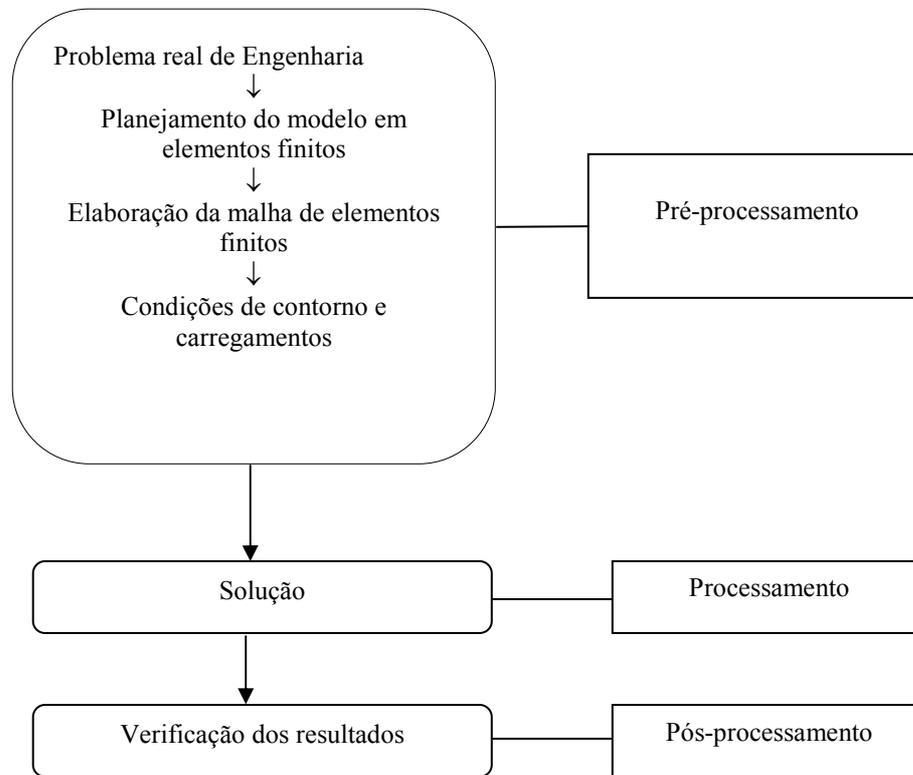


Figura 2.9 - Seqüência de etapas para aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF)

2.3.2 - Teoria Macromecânica para Laminados Compósitos

As considerações preliminares sobre o MEF prescrevem a estratégia que deve ser adotada neste trabalho, começando-se pela modelagem e as relações matemáticas baseadas no comportamento mecânico de corpos sólidos de revolução e de laminados compósitos. A lei fundamental da Mecânica, para os sólidos deformáveis, é a lei de Hooke, que estabelece uma relação linear entre a tensão, σ , e a deformação produzida, ϵ , que é dada por $\sigma = E \cdot \epsilon$, onde E é a constante de rigidez para sólidos considerados unidimensionais, como vigas e trilhos, dentre outros. Entretanto, neste trabalho, a estrutura é tridimensional, onde aparece a natureza tensorial, das tensões e deformações, σ e ϵ . Desta maneira, se expressa a lei de Hooke generalizada, usando notação matricial, como $\{\sigma\} = [\bar{Q}] \{\epsilon\}$, onde $\{\sigma\}$ é o vetor das

tensões, $[\bar{Q}]$ é a matriz de rigidez e $\{\varepsilon\}$ é o vetor das deformações. É conveniente ressaltar que as tensões de cisalhamento, transversais, devido a esforços cortantes, para cascas cilíndricas de parede fina, são desprezíveis, i.e., $Q_{\phi} = 0$.

Para uma lâmina compósita com reforço unidirecional, na direção 1, i.e., na direção das fibras, conforme se mostra na Figura 2.10, serão obtidas as relações entre tensões e deformações. Neste caso particular, as tensões normais são aplicadas paralelamente às fibras, σ_1 , e perpendicularmente às fibras, σ_2 , e ainda, τ_{12} é a tensão cisalhante no plano da lâmina (1,2).

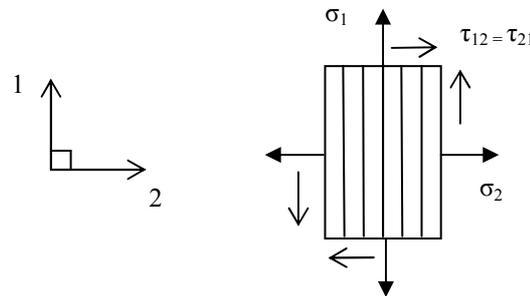


Figura 2.10 – Representação de uma lâmina com as tensões normais, σ_1 e σ_2 , e de cisalhamento, τ_{12} e τ_{21} , e o sistema de coordenadas principais 1 e 2

Pode-se escrever o comportamento macromecânico de uma lâmina ortotrópica, no regime elástico, pela lei de Hooke generalizada, onde as tensões são ligadas às deformações por um estado plano de tensões nas direções principais 1 e 2 (Jones,1975):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}, \quad (2.32)$$

$$Q_{11} = E_{11} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad (2.33)$$

$$Q_{22} = E_{22} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad (2.34)$$

$$Q_{12} = \nu_{12}E_{22} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) = \nu_{21}E_{11} / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad (2.35)$$

$$Q_{66} = G_{12}. \quad (2.36)$$

Onde E_{11} e E_{22} são módulos de Young, ν_{12} e ν_{21} são coeficientes de Poisson e G_{12} é o módulo de cisalhamento, todos definidos nas coordenadas 1 e 2 da lâmina.

O reparo compósito é constituído de lâminas individuais bidimensionais, i.e., a espessura é da ordem de décimos de milímetros. As tensões normais, em geral, não estão nas mesmas direções principais 1 e 2, e por conseqüência precisam passar por uma transformação para as coordenadas x e y . Daí em diante, designa-se por σ_x e σ_y , que, na forma matricial, escreve-se, $[\sigma]_{(x,y)} = [T] [\sigma]_{(1,2)}$, onde $[T]$ é a matriz de transformação que depende de funções trigonométricas cujo argumento é o ângulo, α , entre as fibras e a tensão normal, σ_1 , e que $[\sigma]_{(1,2)}$ é dada pela equação 2.32. Neste trabalho, o ângulo α , entre as fibras e a tensão normal, σ_1 , é nulo, portanto se passarão a considerar as coordenadas como $1 = x$ e $2 = y$. Isto faz com que a matriz de rigidez da lei de Hooke generalizada, escrita por $[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][T]^T$, reduza-se a $[Q] = [\bar{Q}]$, pois, neste caso, $[T]^{-1} = [T]^T = I$, onde I é a matriz identidade. Desta maneira, a equação da lei de Hooke generalizada é expressa por $\{\sigma\} = [\bar{Q}]\{\varepsilon\}$, que é mostrada na equação 2.32. Daqui a diante, a simplificação do modelo dos laminados utilizados no COMPSHELL será apresentada pela Figura 2.11, que ilustra as resultantes de tensão e de momento obtidas através das tensões normais principais num laminado.

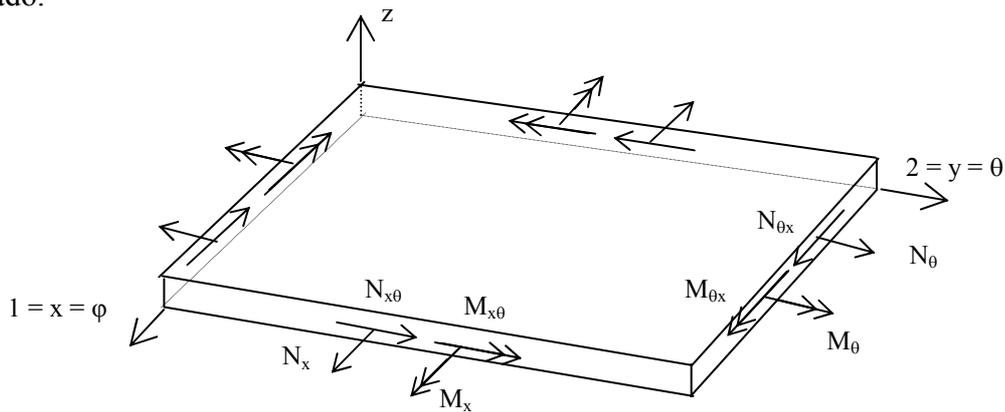


Figura 2.11 – Representação das resultantes de tensões e de momentos no laminado

Nas subseções 2.2 e 2.3, algumas considerações sobre cascas cilíndricas de parede fina já foram comentadas, e daqui em diante, serão válidas para as simulações numéricas: (i) sendo o momento torçor nulo, as tensões cisalhantes são $\tau_{12} = \tau_{21} = 0$, logo as resultantes de momentos torçores são $M_{x\theta} = M_{\theta x} = 0$ e de tensões cisalhantes são $N_{x\theta} = N_{\theta x} = 0$; (ii) os reparos compósitos que possuem reforços com fibras de vidro, na simulação numérica, serão orientadas, nas direções, $x = 1$ e $y = 2$, logo, a matriz de rigidez será dada por $[Q]$; (iii) a última consideração é em relação ao plano médio do laminado, que é paralelo ao plano $x-\theta$. Neste caso, utilizaram-se coordenadas cilíndricas, situadas no ponto médio da espessura, t , na origem da coordenada z , que obedece a uma convenção que pode ser visualizada por meio da Figura 2.12.

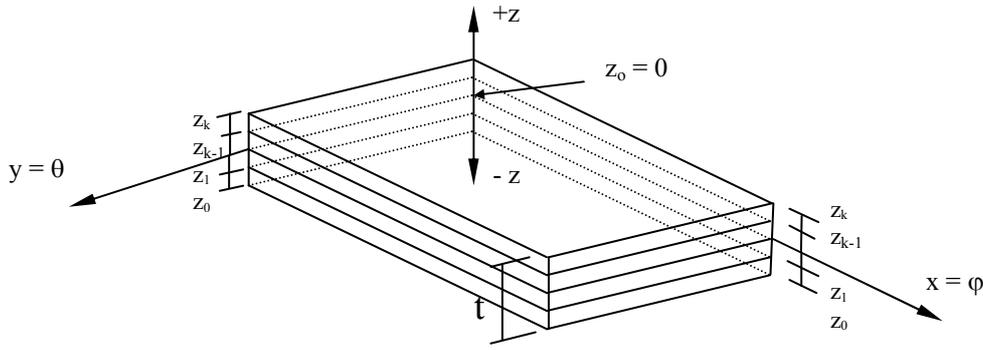


Figura 2.12 - Representação geométrica de um laminado com 5 camadas

Desta maneira, as deformações $(\varepsilon_1^k, \varepsilon_2^k \text{ e } \gamma_{12}^k)$ em uma camada genérica k , resultam da soma das deformações do plano médio $(\varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0 \text{ e } \gamma_{12}^0)$, com a adição do produto da coordenada z_k do laminado pelas variações de curvaturas do plano médio $(\kappa_1^0, \kappa_2^0 \text{ e } \kappa_{12}^0)$, o que é mostrado na equação 2.37 (Jones, 1975):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^k \\ \varepsilon_2^k \\ \gamma_{12}^k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12}^0 \end{Bmatrix} + z_k \begin{Bmatrix} \kappa_1^0 \\ \kappa_2^0 \\ \kappa_{12}^0 \end{Bmatrix}. \quad (2.37)$$

As relações entre as tensões normais σ_φ e σ_θ e as cisalhantes $\tau_{\varphi\theta}$ e $\tau_{\theta\varphi}$, com as deformações normais e de cisalhamento para uma lâmina genérica k , de coordenada z_k em relação ao plano médio do laminado de espessura, t , são dadas por (Jones, 1975):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12}^0 \end{Bmatrix} + z_k \begin{Bmatrix} \kappa_1^0 \\ \kappa_2^0 \\ \kappa_{12}^0 \end{Bmatrix} \right]. \quad (2.38)$$

As tensões atuantes σ_φ e σ_θ , em cada lâmina, causam resultantes de tensões normais, N_φ e N_θ , que são dadas por:

$$N_\varphi = N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_1 dz, \quad (2.39)$$

$$N_y = N_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_2 dz. \quad (2.40)$$

As tensões causam também, resultantes de momentos fletores, M_φ e M_θ , dadas por:

$$M_\varphi = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_1 z dz, \quad (2.41)$$

$$M_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_2 z dz. \quad (2.42)$$

Para finalizar as apresentações das relações matemáticas que vão ser adotadas na simulação numérica, em que se conhece o carregamento externo, as propriedades mecânicas, a espessura e a posição em relação ao plano médio de cada lâmina, o sistema de equações é determinável por meio das equações 2.32 a 2.42 e das equações matriciais 2.43 a 2.50, das quais vão se calcular as resultantes de tensões normais e de momentos fletores no laminado, seja na interface superior ou inferior, fixando as coordenadas de referência sempre no plano médio do laminado. Desta maneira, é possível determinar de cada lâmina as deformações e as tensões, partindo das resultantes de tensão e de momento e, em seguida, obter as deformações e curvaturas do plano médio do laminado (Jones, 1975):

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^k\} \\ z_k \end{Bmatrix} dz_k, \quad (2.43)$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0 + z_k \kappa^0\} \\ z_k \end{Bmatrix} dz_k, \quad (2.44)$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix}, \quad (2.45)$$

Ou

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}. \quad (2.46)$$

Onde a matriz de rigidez $[\bar{Q}] = [Q]$ logo os elementos das matrizes $[A]$, $[B]$ e $[D]$, apresentam-se como A_{ij} , B_{ij} e D_{ij} , em função do elemento da matriz de rigidez de cada lâmina k , $(Q_{ij})_k$, e também, das coordenadas ao longo da espessura da lâmina, na camada inferior e superior, z_{k-1} e z_k , são dados por (Jones, 1975):

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (Q_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad i, j = 1, 2 \text{ e } 6, \quad (2.47)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (Q_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2), \quad i, j = 1, 2 \text{ e } 6, \quad (2.48)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (Q_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), \quad i, j = 1, 2 \text{ e } 6. \quad (2.49)$$

As matrizes [A], [B] e [D] revelam, por meio dos valores de seus elementos, o comportamento mecânico do laminado, ilustrado pela equação matricial 2.50:

$$\begin{array}{c}
 \text{Acoplamento cisalhamento-extensão} \qquad \qquad \text{Acoplamento flexão-extensão} \\
 \downarrow \\
 \left\{ \begin{array}{l} N_1 \\ N_2 \\ N_{12} \end{array} \right\} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} \underbrace{\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12} \end{array} \right\}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} \underbrace{\left\{ \begin{array}{l} \kappa_1^0 \\ \kappa_2^0 \\ \kappa_{12}^0 \end{array} \right\}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} \\
 \\
 \left\{ \begin{array}{l} M_1 \\ M_2 \\ M_{12} \end{array} \right\} = \underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} \underbrace{\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_{12} \end{array} \right\}}_{\text{Acoplamento flexão-extensão}} + \underbrace{\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}}_{\text{Acoplamento flexão-torção}} \underbrace{\left\{ \begin{array}{l} \kappa_1^0 \\ \kappa_2^0 \\ \kappa_{12}^0 \end{array} \right\}}_{\text{Acoplamento flexão-torção}}. \quad (2.50) \\
 \uparrow
 \end{array}$$

2.3.3 - Programa COMPSHELL

O COMPSHELL é um programa de elementos finitos baseado na Teoria de Cascas Finas Axissimétricas, que possibilita a realização de simulação numérica sob estados de tensões variados (Mistry, 1994). O COMPSHELL é elaborado conforme a Teoria Geométrica Não Linear de Cascas Finas (Novozhilov, 1959). O programa permite que o material em camadas seja ortotrópico, e assume que a casca seja de parede fina quando a razão entre o raio (R) e a espessura (t), R/t seja igual ou maior que dez. Neste trabalho, R = 50 mm e t = 1,8 mm, logo R/t = 27,8, desta maneira o estado de tensões tridimensional será reduzido para um estado de tensões bidimensional. O programa assume que a casca é axissimétrica e composta por camadas ortotrópicas. As camadas, chamadas de lâminas, têm características próprias e podem ter a princípio qualquer orientação das fibras de reforço.

O elemento básico do programa é um anel axissimétrico com nós nas extremidades. Em relação à superfície média do elemento, cada nó possui quatro graus de liberdade: três de translação e um de rotação. Os deslocamentos de translação são longitudinal (u), circunferencial (v) e radial (w). O deslocamento longitudinal está na mesma direção do eixo de simetria da casca cilíndrica. O deslocamento radial está na mesma direção do raio da casca cilíndrica. Entretanto, o deslocamento circunferencial está na direção tangente à seção circular da casca, portanto perpendicular aos outros dois deslocamentos. A rotação (β) indica o ângulo de rotação meridional, em relação ao eixo x , e está no plano formado pelas direções axial e radial. A Figura 2.13 mostra os graus de liberdade comentados.

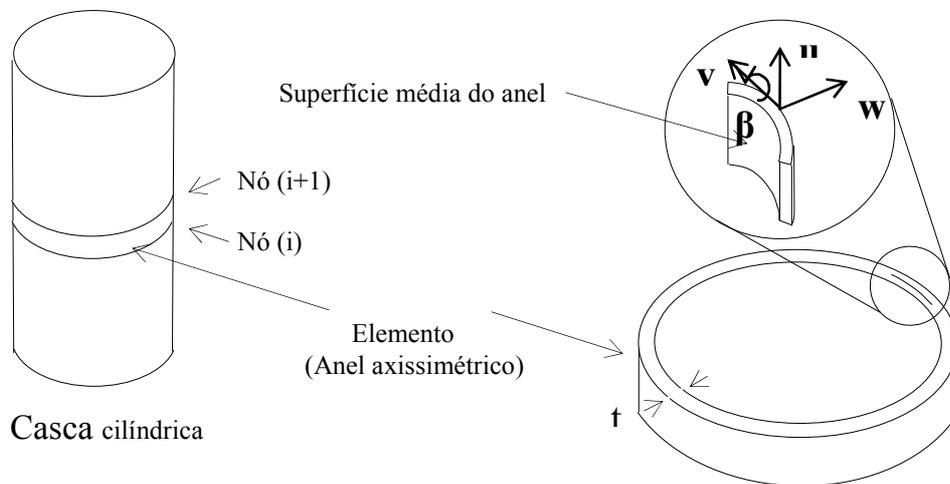


Figura 2.13 - Representação de um elemento finito de casca

As funções de interpolação utilizadas pelo programa para o cálculo das tensões nos elementos são cúbicas para w , quadráticas para β e lineares para u e v . O algoritmo de Newton-Raphson é usado para resolver o sistema de equações não-lineares (Mistry, 1994).

O COMPSHELL despreza o cisalhamento transversal, i.e., $Q_x = 0$, bem como a deformação normal na direção da espessura da parede da casca, e admite a superposição arbitrária de camadas com espessura constante. As camadas são perfeitamente coladas, homogêneas, elásticas e ortotrópicas ao longo da espessura, representada pela coordenada radial (r). No COMPSHELL, a estrutura é dividida em segmentos formados por anéis axissimétricos discretizados em elementos, ao longo da direção axial. Os anéis possuem dois nós, um em cada extremidade, representando os elementos da estrutura, conforme a Figura 2.12. Os segmentos são unidos por junções e a parede da casca é idealizada pela

superposição de camadas, ao longo da espessura. A primeira camada se situa à esquerda em relação ao sentido positivo da coordenada s . A Figura 2.14 mostra os elementos representativos, utilizados pelo COMPSHELL (Levy Neto, 1991), para tubo íntegro, desbastado e reparado. A parede do tubo, onde se aplicou pressão hidrostática interna e as condições das extremidades sem tampa, engastada de um lado, e apoiada do outro, também é apresentada na Figura 2.14.

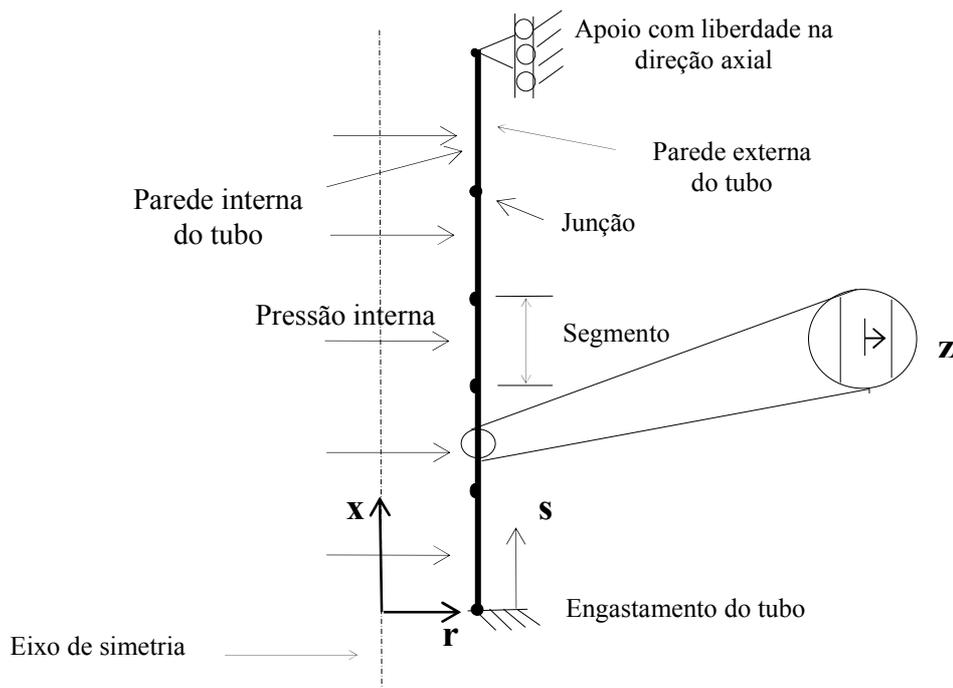


Figura 2.14 - Modelagem geral do COMPSHELL para tubos

O programa permite que se analise a estrutura quanto à falha, sob diversos critérios. Neste trabalho, serão simulados deslocamentos e esforços de cascas cilíndricas em equilíbrio estático, sob pressão hidrostática interna, com o critério de falha de Tsai-Hill (Jones, 1975).

O arquivo de saída do COMPSHELL fornece os deslocamentos de translação, o de rotação, as resultantes de tensão e de momento ao longo da estrutura, calculados em relação à superfície média da casca, para cada nó dos elementos. Portanto, chega-se à deformação desejada, sabendo os valores do deslocamento e do comprimento inicial.

A escolha do número de elementos de cada segmento é importante, porque quanto maior esse número, mais rápido os resultados convergirão para os valores esperados, embora o tempo computacional seja maior. Para cada segmento, é necessário informar a quantidade de camadas; as coordenadas, longitudinal (coordenada x), radial (coordenada

r), ao longo do comprimento do tubo (coordenada s) e ao longo da espessura do tubo (coordenada z); as propriedades mecânicas da camada; e a espessura (t).

A Tabela 2.1 mostra os valores comparativos, de esforços N_θ (no centro), M_θ e M_x (no engastamento), e de deslocamento radial, w (no centro), entre os valores analíticos e os da simulação numérica pelo COMPSHELL, com o número de elementos entre 150 e 190, para tubo íntegro biengastado de PVC e de alumínio (Al), com propriedades elásticas e característica geométrica ($L/R=10$), já definidas nas figuras 2.3 e 2.4, e submetido à pressão hidrostática interna uniforme (p), no regime elástico, para pressão interna de 0,60 MPa. A Tabela 2.1 mostra os resultados com desvios de até cerca de 80% de momentos fletores, próximos às extremidades, entre a solução numérica e a solução analítica de Kraus. É preciso notar que a convenção de sinais para as resultantes de momento fletor da solução analítica é o contrário a da solução numérica. Na região central, que é foco deste trabalho, os resultados são concordantes entre a solução numérica e analítica de Kraus.

Tabela 2.1 – Soluções analítica e numérica para tubo íntegro biengastado de PVC e Al para pressão hidrostática interna $p = 0,60$ MPa

Tipo de tubo	PVC rígido		Alumínio (Al)		Diferença Percentual (%) $100 \cdot \frac{ (i) - (ii) }{ (i) }$	
	(i) Solução analítica	(ii) Solução numérica	(i) Solução analítica	(ii) Solução numérica	PVC	Al
Esforços e deslocamentos radiais						
M_θ [N]	1,298*	-0,284**	1,134***	-0,275**	+78,12	+75,74
M_x [N]	3,244*	-0,710**	3,778***	-0,832**	+78,11	+77,97
N_θ [N/mm] (x=250 mm)	30,00	29,86	30,00	29,99	+0,47	+0,03
w [mm] (x=250 mm)	0,278	0,233	0,0110	0,0091	+16,19	+17,27

* Esses são os valores máximos positivos de resultantes de momento circunferencial e longitudinal na solução analítica de Kraus na posição axial $x = 477$ mm.

** Esses são os valores de resultantes de momento circunferencial e longitudinal no COMPSHELL correspondentes à posição axial $x = 477$ mm no tubo de PVC, e $x = 475,6$ mm no de alumínio.

***Esses são valores máximos positivos de resultantes de momento circunferencial e longitudinal na solução analítica de Kraus na posição axial $x = 475,6$ mm.

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – VISÃO GERAL DOS ENSAIOS

As próximas subseções detalharão cada etapa dos procedimentos experimentais. As propriedades físicas e mecânicas dos tubos utilizados, de PVC rígido, bem como a caracterização geométrica de cada amostra fornecerão as identificações dos corpos de prova nas subseções 3.2 e 3.3. Ainda na subseção 3.3, a determinação de raios e espessuras médias mostrará o grau de ovalização dos corpos de prova. A preparação dos corpos de prova, mostrada na subseção 3.4, por meio da configuração de três tipos: íntegros, desbastados e reparados. Além disso, o dimensionamento e procedimento de colagem das tampas. A seguir, será apresentada a metodologia de desbaste e de reparos compósitos. Acrescentando ainda à preparação dos corpos de prova, tanto de tubos de PVC rígido e quanto de alumínio, na subseção 3.5 mostrará a instrumentação dos corpos de prova com dois tipos de extensômetros: unidirecional e roseta. Para completar a instrumentação dos corpos de prova, será mais detalhado o sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho, em que serão mostradas a ligação dos cabos elétricos nos canais e a calibração tanto dos extensômetros quanto do transdutor de pressão. Na subseção 3.6, o dimensionamento do sistema hidráulico de pressão será apresentado com as capacidades das conexões e mangueiras, bem como da bomba hidráulica. A finalização dos procedimentos experimentais são os esclarecimentos de como serão realizados os ensaios com o corpo de prova de alumínio e os de PVC rígido. Podem-se esquematizar por meio da Figura 3.1 todos os componentes importantes dos ensaios.

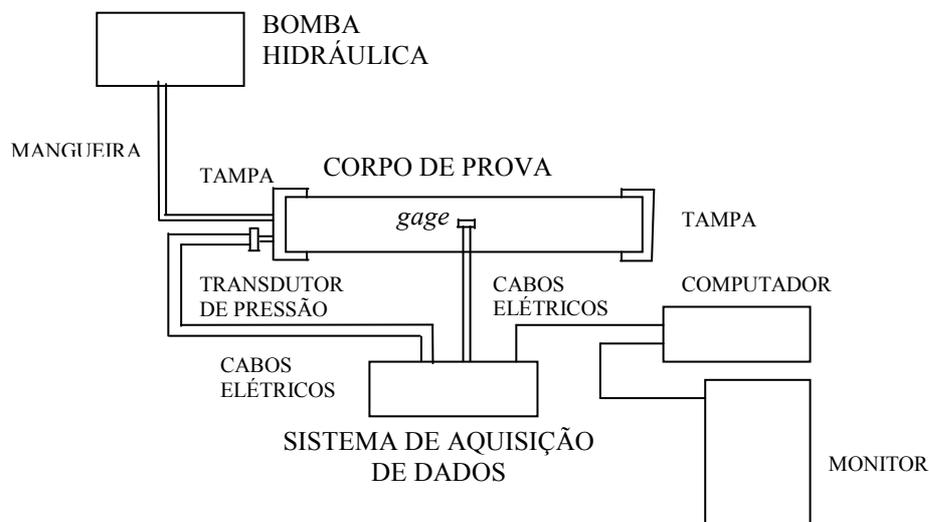


Figura 3.1 – Esquema de ensaio do corpo de prova com componentes de ligação entre equipamentos, instrumentos, e sistema de aquisição de dados

3.2 – PROPRIEDADES GERAIS DE TUBO DE PVC RÍGIDO

As propriedades do cloreto de polivinila (PVC) são influenciadas pelo processo de fabricação de tubos de PVC rígidos, portanto deve ser conhecida, antes de se iniciar o procedimento experimental. O processo de fabricação de tubos de PVC rígidos, que é por extrusão, produz também, conexões como componentes de ligação entre os tubos. Os tubos de PVC rígido que existem no mercado apresentam propriedades físicas variadas, podendo-se citar a densidade, módulos de Young, resistências à tração e absorção de água, as quais são visualizadas, como exemplo, na Tabela 3.1. O PVC rígido é um polímero termoplástico, e, quando não contém plastificantes, apresenta-se relativamente duro e tenaz, podendo ser composto para várias finalidades (Gorni, 2003). Uma das propriedades mais enfatizadas do PVC é a baixa inflamabilidade, dentre os plásticos de engenharia. Além disso, possui, em geral, boa resistência à corrosão e à oxidação, boa isolamento elétrica e térmica, e resistência a intempéries (Albuquerque, 1990). No entanto, sofre corrosão por agentes específicos, tais como solventes aromáticos, cetonas, acrilatos ésteres, aldeídos, naftalenos e alguns cloretos e acetatos, desta maneira, é preciso misturar agentes modificadores, que de forma geral, melhoram a resistência à corrosão (Albuquerque, 1990). É importante mencionar que o único fluido utilizado foi um óleo hidráulico que não ataca o PVC. A utilização de PVC é recomendável para faixa de temperatura entre -40 °C e 65 °C (Telles, 1997), que nos ensaios realizados não ultrapassou estes limites, ocorrendo entre 20 °C e 30°C. A condutividade térmica (K) do PVC é muito baixa comparada com a dos metais, principalmente a do aço, i.e. K_{PVC} é de 14,63 a 20,9 (Albuquerque, 1990) e $K_{aço}$ é de 2762,98 a 5107,96 (Sárközi, 1961), ambas em unidades de 10^{-4} W/m.K, trazendo nenhuma consequência significativa para as propriedades mecânicas do PVC, devido à fase de preparação do corpo de prova (CP).

Tabela 3.1 - Propriedades de tubo de PVC rígido (Albuquerque, 1990; Matweb, 2005)

Densidade [g/cm ²]	Módulo de Young [GPa]	Alongamento na ruptura [%]	Resistência à tração [MPa]	Expansão térmica linear [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	Absorção de água em 24h para tubo de t = 3 mm [%]
1,30 a 1,58	1,2 a 3,16	40 a 80	14 a 52	60 a 80	0,04 a 0,40

3.3 – CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA

O método de medida para determinação da variação de raio, para quantificar-se a ovalização dos tubos de PVC, baseou-se no manual de equipamentos do laboratório de Metrologia (Piratelli Filho, 1976). O instrumento utilizado chama-se “esferômetro”, que possui um relógio comparador alemão da marca Veb Feinmesszeugfabrik Suhl, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição até 10 mm. Detalhes sobre o funcionamento e uso do “esferômetro” podem ser encontrados em Maia (2003). O trabalho foi realizado no laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM), onde se fizeram as medidas de espessura e de parâmetros geométricos para o cálculo de raio médio de seis amostras de tubos de PVC de diâmetro nominal de 100 mm. A Figura 3.2 mostra os instrumentos, as amostras e equipamentos necessários para fazer as medidas. Nesta seção, será mostrada a dedução da expressão para calcular a variação de raio de tubos ao longo do perímetro externo, tendo como padrão de medida cinco linhas circunferenciais distanciadas de 100 mm, na direção axial do tubo, e dez pontos para cada uma dessas circunferências em todas as amostras de tubo e o procedimento das medidas para a variação de raio ao longo do perímetro externo. Na seção 3.2.1, serão mostradas as tabelas de média e desvio padrão do raio e da espessura de amostras de tubos identificadas com números de 1 a 6.



Figura 3.2 - Instrumentos para determinação do raio e da espessura médios

A Figura 3.3 mostra os pontos fixos A e D, do esferômetro onde é apoiado e que é dotado de um sensor localizado no ponto B que registra o deslocamento, δ , devido à curvatura do tubo. Os principais parâmetros, a e δ , foram medidos para determinação da variação do raio do tubo. O valor de a é 16,5 mm, um parâmetro constante do esferômetro, δ é a variação do raio a ser medido e R é o raio do tubo.

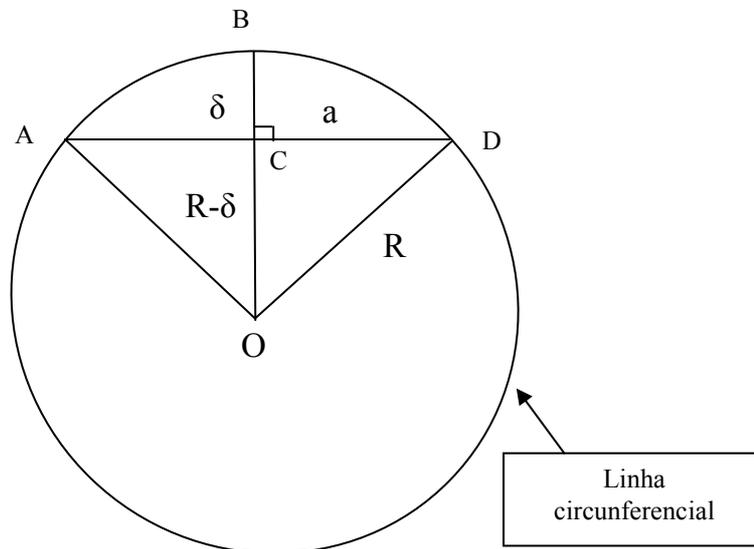


Figura 3.3 - Parâmetros geométricos para a medição do raio

Utilizando o teorema de Pitágoras no triângulo COD, obtém-se a equação 3.1:

$$R^2 = a^2 + (R - \delta)^2 \quad (3.1)$$

Evidenciando R da equação 3.1, chega-se à equação desejada 3.2:

$$R = \frac{a^2 + \delta^2}{2\delta} \quad (3.2)$$

Existem quatro passos importantes na medição do raio médio e da espessura média. Primeiro, colocaram-se os tubos apoiados num bloco metálico em “V” de 90°, fixado através de três bases magnéticas numa mesa de desempenho, mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Bloco em “V” (canto superior esquerdo) na mesa de desempenho vermelha

No segundo passo, traçaram-se com um paquímetro de altura na mesa de desempenho as cinco linhas circunferenciais com quatro divisões equidistantes de 100 mm, ao longo da direção axial do tubo, e dez divisões em cada linha circunferencial, visto na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Traçado das linhas circunferenciais com paquímetro de altura

No terceiro passo, fixou-se um braço articulado para a amostra de tubo não deslocar na direção axial durante as medidas, que é mostrado atrás do tubo na Figura 3.6. Depois, mediu-se com o esferômetro, o parâmetro δ , de dez pontos para cada linha circunferencial, totalizando 50 pontos por amostra de tubo.



Figura 3.6 - Medição do parâmetro, δ , de variação de raio, com o esferômetro

No quarto passo, para as medidas de espessura, foram tomados dez pontos equidistantes nas duas linhas circunferenciais, uma em cada extremidade, já traçados no segundo passo, totalizando 20 pontos de medição por amostra de tubo.

3.3.1 - DETERMINAÇÃO DE RAIOS E ESPESSURA MÉDIOS

É importante obter os valores médios de raio e de espessura das amostras para que, em relação à variação do raio ao longo das linhas circunferenciais, defina-se o grau de ovalização na região central, mostrada na Figura 3.6, que foi realizado no programa Excel 2003, para determinar até que ponto pode se desbastar a amostra uniformemente. A Tabela 3.2 mostra os valores médios e desvios padrões de raios, medidos com esferômetro, seguindo os quatro passos de preparação para as medidas, mostrados nas figuras 3.4, 3.5 e 3.6, de cada amostra de tubo de PVC, de diâmetro nominal de 100 mm, identificada com números de 1 a 6. A Tabela 3.3 mostra os valores médios de medidas de diâmetros interno e externo, com paquímetro da marca CSE de resolução de 0,05 mm, faixa de medição de 300 mm e de garra de 100 mm, das amostras já identificadas na Tabela 3.2, utilizando também, os mesmos pontos da malha, onde as cinco linhas circunferenciais foram desenhadas com marcador (tinta permanente) fixado num paquímetro de altura, e depois as dez linhas longitudinais equidistantes com auxílio de régua metálica de resolução de 0,1 mm e faixa de medição de 600 mm, durante a preparação das seis amostras. Todas as medidas foram realizadas dentro do Laboratório de Metrologia com temperatura de 21 °C.

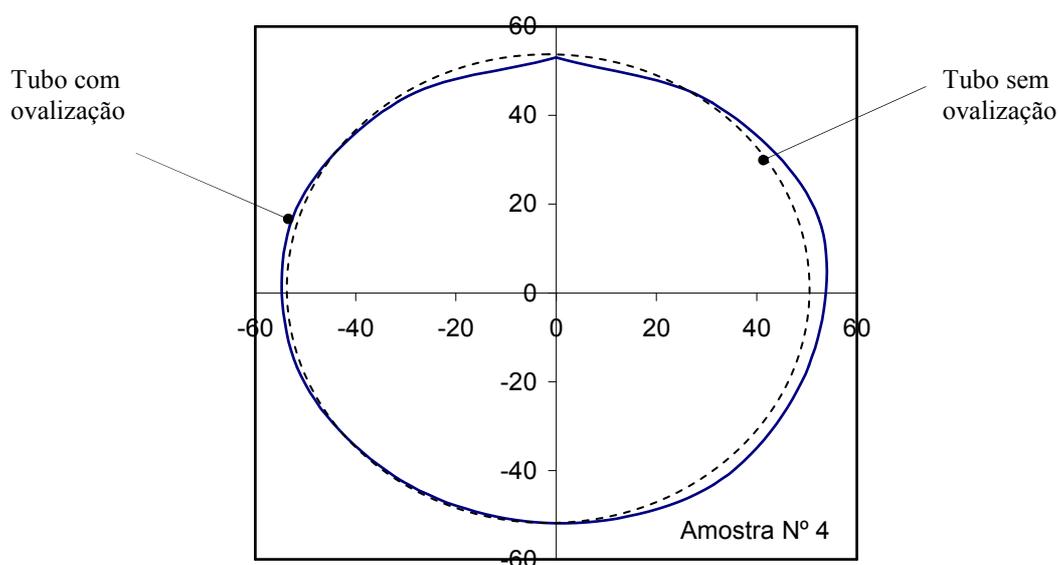


Figura 3.7 - Representação do grau de ovalização na região central de amostra a ser desbastada

Tabela 3.2 – Medições de raio médio e desvio padrão de amostras de tubo de PVC, através de um esfêrometro, à temperatura ambiente média de 21 °C.

Amostras	Raio médio [mm]	Desvio padrão [mm]
1	50,71	1,54
2	54,56	1,36
3	53,86	1,19
4	54,18	1,23
5	53,81	1,06
6	52,39	0,88
Valor médio	53,25	1,41

Tabela 3.3 – Medições de diâmetros médios, interno e externo, de amostras de tubo de PVC, através de um paquímetro, à temperatura ambiente média de 21 °C

Amostras	Diâmetro interno [mm]	Diâmetro externo [mm]
1	97,80	101,40
2	97,00	101,50
3	97,20	101,00
4	97,40	101,50
5	97,80	101,50
6	97,60	101,40
Valor médio	97,47	101,38

A espessura média foi medida com paquímetro da marca CSE de resolução de 0,05 mm, faixa de medição de 300 mm e de garra de 100 mm, nos dez pontos de cada lado das extremidades da amostra, formados pela interseção das linhas longitudinais com as circunferenciais, totalizando 20 medidas por amostra. Os valores da espessura média e

desvio padrão das amostras de tubo de PVC, de espessura nominal de 1,8 mm, já selecionadas e numeradas anteriormente de 1 a 6, são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Medições de espessura média e seu desvio padrão de amostras de tubo de PVC, através de um paquímetro, à temperatura ambiente média de 21 °C

Amostras	Espessura média [mm]	Desvio padrão [mm]
1	1,87	0,05
2	1,80	0,04
3	1,80	0,05
4	1,86	0,07
5	1,82	0,04
6	1,93	0,04
Valor médio	1,85	0,05

3.4 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Esta parte do trabalho será organizada conforme os seguintes procedimentos: (i) configuração dos corpos de prova; (ii) dimensionamento e colagem das tampas; (iii) metodologia de desbaste e de aplicação dos reparos compósitos; (iv) caracterização dos extensômetros (*strain gages*); (v) fixação nos corpos de prova; (vi) dimensionamento das mangueiras, conexões e da bomba hidráulica; e (vii) descrição do sistema de aquisição de dados e instrumentação.

3.4.1 – Configuração dos corpos de prova

As dimensões médias do diâmetro e da espessura das amostras que foram desbastadas, na região central, estão na Tabela 3.5. A identificação dos corpos de prova que foram ensaiados pode ser visualizada na Tabela 3.6. E, ainda, as figuras 3.8, 3.9 e 3.10 ilustram as três configurações de corpos de prova engastados na extremidade esquerda, e, na direita, apoiados com liberdade de deslocamento axial: tubo íntegro (TI), tubo desbastado (TD) e

tubo reparado (TR). A espessura limita a ação da ferramenta de corte no torno para os corpos de prova desbastados deste trabalho, o formato da linha de desbaste na interface com a região íntegra do tubo só pode ter 90° em relação ao eixo axial do tubo.

Tabela 3.5 – Médias de diâmetro e espessura na região desbastada de tubos de n^{os} 3 a 6

Amostra	Diâmetro externo na região do desbaste [mm]	Espessura na região desbastada [mm]
3	99,70	0,90
4	99,70	0,96
5	99,70	0,92
6	99,80	1,02

Tabela 3.6 – Identificação detalhada dos corpos de prova de n^{os} 1 a 6

1	Íntegro, faceado e sem rebarbas
2	Íntegro, faceado e sem rebarbas
3	Desbastado mecanicamente na região central com profundidade 0,9 mm ao longo de 100 mm da direção longitudinal, faceado e sem rebarbas
4	Desbastado mecanicamente na região central com profundidade 0,9 mm ao longo de 100 mm da direção longitudinal, faceado e sem rebarbas
5	Desbastado mecanicamente na região central com profundidade 0,9 mm ao longo de 100 mm da direção longitudinal, faceado e sem rebarbas
6	Desbastado mecanicamente na região central com profundidade 0,9 mm ao longo de 100 mm da direção longitudinal, faceado e sem rebarbas

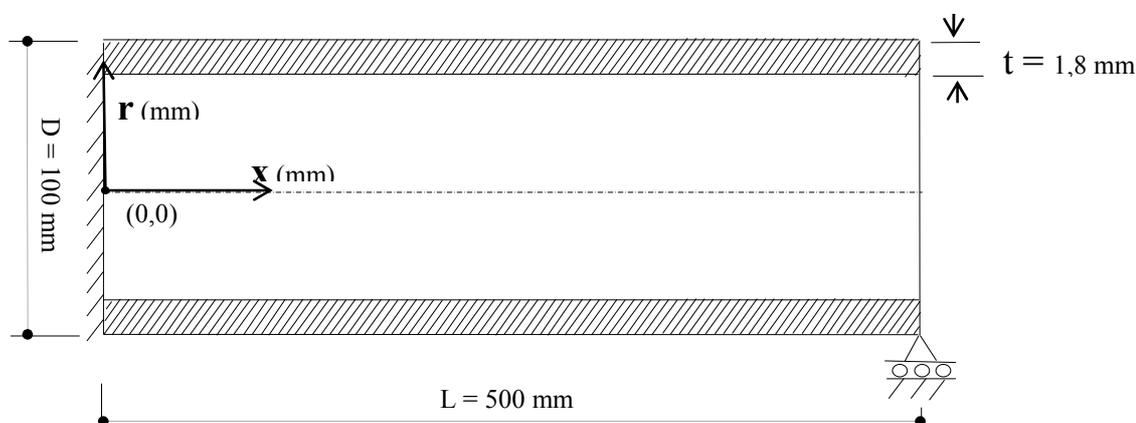


Figura 3.8 – Representação de CP de tubo íntegro (TI) tampado nas extremidades

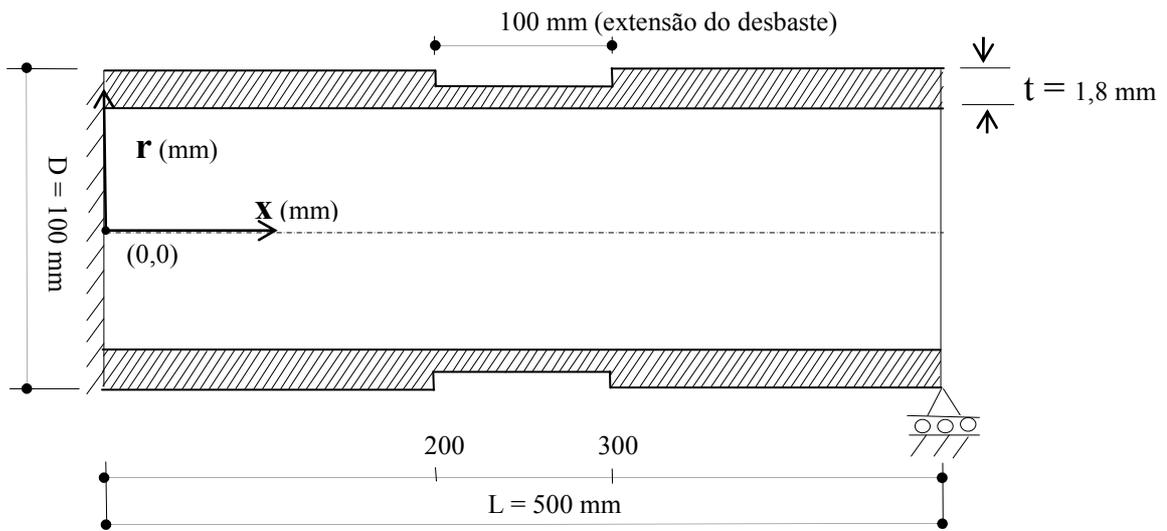


Figura 3.9 – Representação de CP de tubo desbastado (TD) tampado nas extremidades

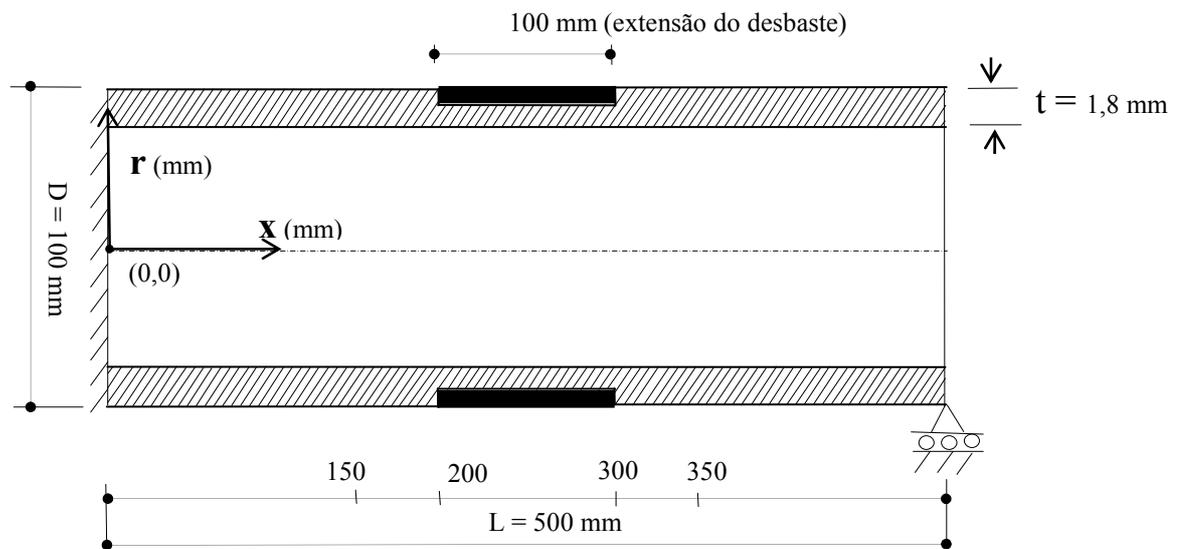


Figura 3.10 – Representação de CP de tubo reparado (TR) tampado nas extremidades

3.4.2 – Dimensionamento e colagem das tampas

Foram utilizados dois tipos de tampas para fechamento das extremidades dos corpos de prova: uma de alumínio (com aberturas rosqueadas para fixação do manômetro e da mangueira de pressão) e a outra de PVC. A confecção da tampa de alumínio foi realizada com um tarugo de alumínio extrudado, medindo 250 mm de comprimento e 127 mm de

diâmetro. Foram fabricadas seis tampas, com diâmetro de 120 mm, sulcos de profundidade de 20 mm e 6 mm de largura, que permitissem a elas ser fixadas nos tubos de PVC de diâmetros de 80 mm e 100 mm. As figuras 3.11 e 3.12 mostram a tampa encaixada no tubo de PVC de 100 mm e a vista de perfil da tampa, respectivamente. Na limpeza do sulco, se passou um algodão molhado com desengraxante, neste caso, a acetona, e depois de seco, fez-se uma lavagem durante 2 minutos, com decapante de ácido sulfúrico, que apresentou 12% de concentração em peso (Pardini, 2005). Na seqüência, os sulcos das tampas de alumínio foram preenchidos com adesivo epóxi, para vedação e engastamento, e logo a seguir foi realizada a colagem.



Figura 3.11 – Tampa encaixada no tubo de PVC e colada com araldite industrial

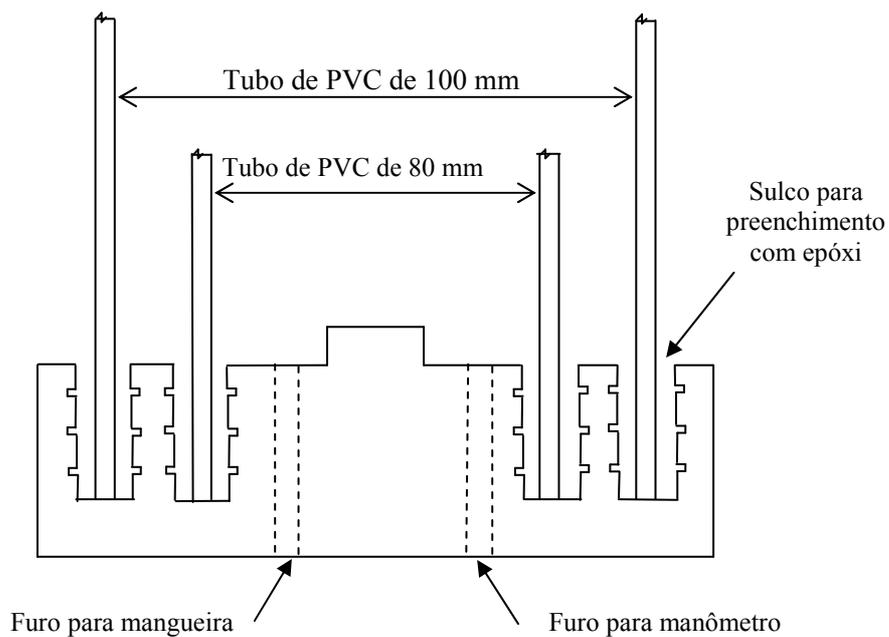


Figura 3.12 – Perfil da tampa de alumínio com sulcos para a colagem com epóxi

A fixação das tampas nos tubos realizou-se com adesivo (resina epóxi), que é uma mistura de proporção de 100 g Araldite LY 1316 BR para 13 g de endurecedor HY 1208, de cura a frio, i.e. temperaturas entre 20 °C e 25 °C, que também foi a faixa de temperatura de trabalho, cujas propriedades encontram-se na Tabela 3.7 (Huntsman, 2005).

Tabela 3.7 – Propriedades físicas do araldite LY 1316 BR empregado nos tubos

Material	Densidade [g/cm ³] a 20 °C	Módulo de elasticidade [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à tração [MPa]	Tempo de cura [horas]
Araldite	1,0 a 1,05	3500	85 a 985	45 a 55	24

A averiguação do equilíbrio de forças entre a tampa e o tubo foi realizada por meio da modelagem dos esforços a que estaria sujeito o araldite ao manter unidos a tampa, de PVC ou de alumínio, e o tubo de PVC, estando a tampa sob pressão máxima de 2 MPa (20 bar).

Considerando a superfície interna da tampa e a externa do tubo, unidas pelo araldite, que suportariam o esforço cisalhante, causado pela pressão interna atuante na tampa, calculou-se o fator de segurança para o tubo de PVC de 100 mm, conforme Figura 3.13.

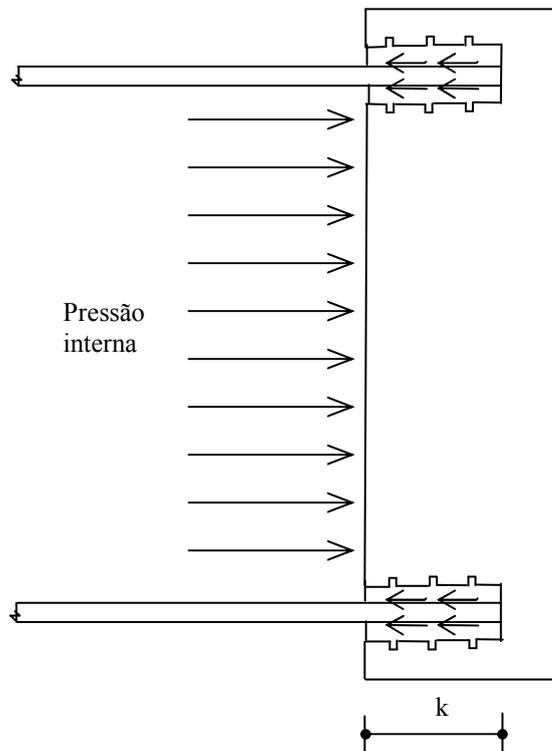


Figura 3.13 – Modelo de equilíbrio de forças nas tampas dos corpos de prova

O equilíbrio de forças causado entre a força aplicada pela pressão interna na tampa e a força cisalhante do adesivo com a parede do sulco da tampa, mostrado na Figura 3.13, onde p é a pressão interna na tampa, τ é a tensão de resistência ao cisalhamento do araldite, R é o raio interno do tubo, t é a espessura do tubo e k é a extensão de colagem do araldite para resistir à força aplicada, é dada pela equação 3.3 (Maia, 2003):

$$p \cdot \pi \cdot R^2 = \tau \cdot (2 \cdot \pi \cdot R \cdot k) + \tau \cdot [2 \cdot \pi \cdot (R + t)] \cdot k \quad (3.3)$$

Ao tomar a equação 3.3 e fazendo algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$k = \frac{p \cdot R^2}{\tau \cdot (4 \cdot R + 2 \cdot t)} \quad (3.4)$$

A colagem da tampa foi realizada com extensão $k = 20$ mm, que é bem superior ao valor obtido pela equação 3.4 é de $k = 1,09$ mm para tubo com $R = 50$ mm, $t = 1,8$ mm, e a tensão cisalhante do araldite é de $\tau = 22,5$ N/mm² (Huntsman, 2005) e pressão interna de $p = 2$ N/mm², logo o fator de segurança (F) dos corpos de prova é de $F = 20 / 1,09 = 18,34$ para tubos de diâmetro externo de 100 mm.

Os tubos foram submetidos a pressões internas de até 2 MPa (20 bar). Por medida de segurança, então se fez uma caixa de proteção metálica de aço 1020, com espessura de 3 mm, com 1200 mm de comprimento, 300 mm de largura e 400 mm de altura, com dois mancais 120 mm de altura, fixados na base da caixa, que funcionariam com engastamento de um lado e apoio deixando liberdade axial para os tubos durante os ensaios, o que pode ser visualizado pela Figura 3.14. Caso as tampas se desprendessem das extremidades dos tubos, devido à pressão, as paredes laterais da caixa metálica receberiam o impacto das tampas, evitando qualquer acidente com o laboratorista e aos materiais da sala de teste. A tampa da caixa de proteção metálica é de acrílico, com 5 mm de espessura, que resiste ao impacto de qualquer parte do tubo ou óleo projetados na direção da tampa acrílica, que serve para visualizar a leitura de pressão do manômetro no tubo e de qualquer fenômeno acontecendo durante o ensaio.



Figura 3.14 – Bancada de ensaios com tampa acrílica de 5 mm de espessura

3.4.3 – Metodologia de desbaste

A partir das propriedades de tubo de PVC rígido e da definição do grau de ovalização dos tubos, escolheu-se o processo de torneamento para desbaste, das amostras de n^{os} 3 a 6, de 50% da parede, em que a espessura da amostra, ao longo da região central, ficou com $t_{\text{desbaste}} = 0,9$ mm. O processo de desbaste, depois da amostra fixada no torno elétrico da oficina mecânica (SG-9) da universidade, com extensão de 100 mm, na região central do tubo, foi realizado com duração de 2,28 minutos, e toda a operação, de fixação e de desbaste, consumiu apenas 7 minutos, que é visualizado na Figura 3.15. As deformações térmicas, neste caso, podem ser desprezadas, porque, além de a temperatura ambiente ter sido constante e baixa (entre 20 °C e 30 °C), houve pouco aquecimento por condução, tanto entre a ferramenta de desbaste (ponta de largura 2 mm) e a superfície do tubo, quanto ao longo da extensão de desbaste. Existem dois fatores para que isso aconteça; o primeiro, a condutividade térmica do PVC é baixa, comparada com a do aço da ferramenta de corte, i.e. $K_{\text{aço}} \approx 189 K_{\text{PVC}}$ (Sárközi, 1961; Albuquerque, 1990), e o segundo, é que cada volta do

torno ocorreu em intervalo curto de tempo, ao longo de uma linha circunferencial, com duração de 2,73 segundos, calculado através da rotação do torno, que foi de 132 rpm.



Figura 3.15 – Processo de desbaste de tubo de PVC no torno da oficina (SG-9)

3.4.4 – Metodologia de reparos compósitos

A escolha do tipo de material compósito a ser utilizado para as amostras de tubos de PVC desbastados na região central surgiu dos resultados das simulações numéricas, com diferentes composições de matriz (epóxi ou poliéster) e reforço (tecido balanceado de fibras de carbono ou vidro E), em que este último, em alguns casos foi substituído por carga inerte (algodão). Os reparos compósitos simulados pelo programa COMPSHELL foram carbono/epóxi, vidro-E/epóxi, epóxi/algodão e poliéster/algodão. O fato de o reparo compósito, de uma camada apenas, reforçada com fibra de carbono, possuindo as mais baixas propriedades mecânicas possíveis, e espessura ideal muito difícil de ser conseguida na prática, 0,08 mm, e ainda assim, no resultado da simulação, mostrar estrangulamento excessivo na região do reparo, foi o motivo de ser reprovado no processo de escolha para os ensaios. O reparo de epóxi/algodão, com uma camada de espessura ideal de 0,77 mm, mesmo com bons resultados da simulação no COMPSHELL, também não foi escolhido, devido ao efeito de viscoelasticidade dos corpos de prova de tubo de PVC rígido, que provavelmente continuaria a existir com o reparo de epóxi, utilizando carga de enchimento

de tecido de algodão. E no caso do reparo de poliéster/algodão com uma camada apenas, de espessura ideal de 0,84 mm, aliado ao comportamento mecânico semelhante ao do epóxi/algodão, no processo de fabricação produz gases tóxicos, e ainda absorve umidade após a cura (Hull, 1981), portanto, também foi descartado no processo de escolha para os ensaios. O reparo compósito escolhido nas amostras desbastadas foi o de epóxi/vidro-E (tecido balanceado) com uma camada, de espessura de 0,25 mm, que pode eliminar o efeito de viscoelasticidade na região do reparo dos corpos de prova de tubo de PVC rígido.

Após a impregnação do tecido de vidro-E com epóxi, o reparo foi aplicado diretamente sobre o tubo desbastado na região central. O processo de realização de bolsa de vácuo no procedimento experimental não foi realizado, para manter as propriedades mecânicas mais baixas possíveis, assim reduzindo ao máximo o estrangulamento do reparo compósito. O endurecedor HY 1208, durante cura a frio, não produz gases tóxicos.

A aplicação do reparo compósito segue um procedimento tal, que se possam mensurar, ao final da tarefa, as massas e volumes de carga e de resina contidas no compósito. O procedimento com descrição resumida é: medição do peso do tubo; recorte e medição do peso de tecido de vidro-E; medição dos componentes da resina, adesivo e catalisador; mistura dos componentes da resina; impregnação da resina; aplicação do reparo na região desbastada da amostra; e medição do peso do tubo, com o reparo incorporado.

Deve-se observar que a nova medição de peso mostra a quantidade de resina incorporada, já que o tubo e a carga de tecido de vidro-E foram pesados anteriormente.

As propriedades da matriz de epóxi são as mesmas do adesivo utilizado para fixação das tampas nos corpos de prova, que podem ser visualizadas na Tabela 3.7. O tecido de algodão, com fibras perpendiculares entre si, possui propriedades mostradas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Propriedades mecânicas de tecido de algodão (Anthony Kelly, 1989)

Tipo de carga	Diâmetro [μm]	Densidade [g/cm^3]	Módulo de Young [GPa]	Resistência à tração [MPa]
Algodão	11 a 22	1,52	3,2	226

Serão apresentados na Tabela 3.9 as massas, volumes e frações volumétricas dos componentes utilizados nos reparos em corpos de prova de tubos de PVC de 100 mm, desbastados na região central com profundidade de 0,9 mm.

Tabela 3.9 – Quantidades de massa e volume de reforço e resina utilizados nos reparos

Corpo de prova	Massa de reforço [g]	Massa de resina [g]	Volume de reforço [cm ³]	Volume de resina [cm ³]	Fração volumétrica de reforço [%]	Fração volumétrica de resina [%]
5	12,5	13	5	10,4	32,5	67,5
6	12,5	12	5	9,6	34,2	65,8

As propriedades mecânicas do compósito, obtida através da Teoria Micromecânica (ou regra das misturas) (Maia, 2003; Levy Neto, 1983) são apresentadas na Tabela 3.10. Essas propriedades serão utilizadas no arquivo de entrada do programa COMPSHELL, para se comparar com os resultados experimentais.

Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas dos reparos compósitos utilizados no COMPSHELL

Corpo de prova	Fração volumétrica de reforço [%]	Fração volumétrica de resina [%]	Módulo de Young $E_{11}=E_{22}$ [MPa]	Coefficiente de Poisson $\nu_{12}=\nu_{21}$	Módulo de cisalhamento G_{12} [MPa]
5	32,5	67,5	17475	0,253	2293,9
6	34,2	65,8	18206	0,247	2393,1

3.5 - INSTRUMENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A instrumentação dos corpos de prova foi realizada por meio de colagem dos extensômetros elétricos de resistência (“*strain gages*”); colagem de conectores e soldagem aos extensômetros; e soldagem dos cabos elétricos aos conectores. Estes procedimentos foram idênticos nas três categorias de corpos de prova: tubo íntegro, tubo desbastado e tubo reparado, que é mostrado na Figura 3.16. As tabelas 3.11 e 3.12 mostram os tipos de extensômetros utilizados, direção, resistência elétrica e fator do extensômetro (*gage factor*), e ainda as figuras 3.17 a 3.19 apresentam os corpos de prova após o processo de colagem dos extensômetros com ester cianoacrilato (*Super Bonder*) no centro do tubo.



Figura 3.16 – Processo de colagem dos extensômetros tipo roseta (tubo de alumínio) e tipo unidirecional (tubo de PVC)

Tabela 3.11 – Quadro-resumo das quantidades, tipos, direções e características dos extensômetros nos corpos de prova de tubos íntegros (n^{os} 1 e 2) e desbastados (n^{os} 3 e 4)

Corpo de prova	Quantidade	Tipo	Direção de medição	Resistência [ohm]	Fator do extensômetro
1	2	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
		Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
2	2	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
		Unidirecional	Longitudinal	119,8±0,3	2,12±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,12±1
3	1	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
4	2	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
		Unidirecional	Longitudinal	119,8±0,3	2,12±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,12±1

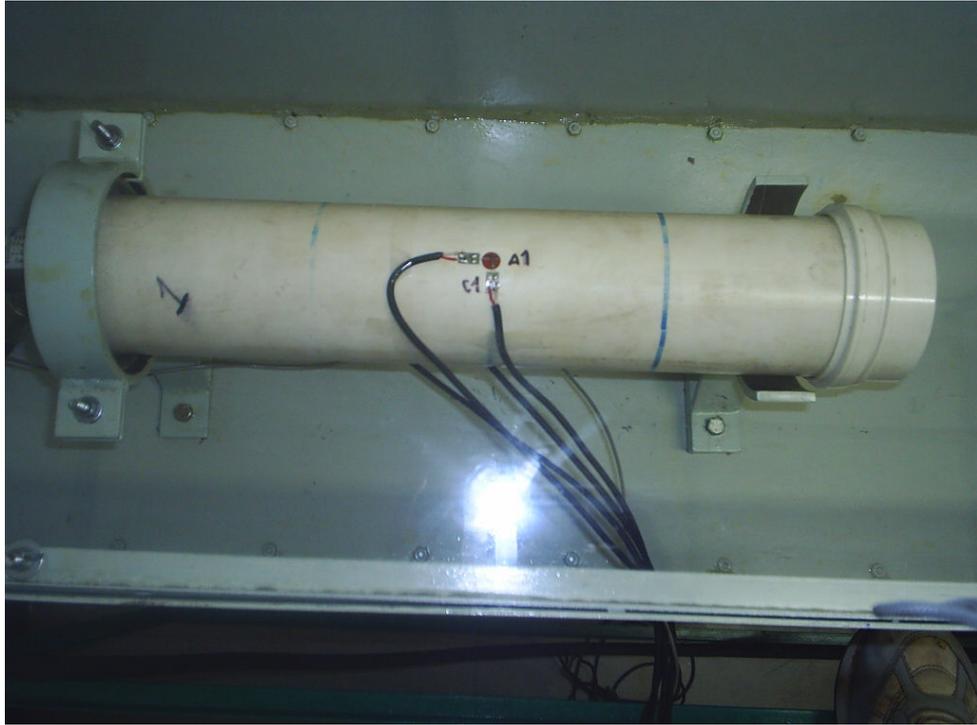


Figura 3.17 – Localização e direção dos extensômetros (roseta) nos CP's n^{os} 1 e 2



Figura 3.18 – Localização e direção dos extensômetros (roseta) nos CP's n^{os} 3 e 4

Tabela 3.12 – Quadro-resumo das quantidades, tipos, direções e características dos extensômetros nos corpos de prova n^{os} 5 e 6

Corpos de prova	Quantidade	Tipo	Direção de medição	Resistência [ohm]	Fator do extensômetro
5	2	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
		Unidirecional	Longitudinal	119,8±0,3	2,12±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,12±1
6	2	Roseta	Longitudinal	119,8±0,3	2,11±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,11±1
		Unidirecional	Longitudinal	119,8±0,3	2,12±1
			Circunferencial	119,8±0,3	2,12±1



Figura 3.19 – Localização e direção dos extensômetros tipo roseta nos CP's n^{os} 5 e 6

3.5.1 - Sistema de aquisição de dados ADS 2000

O sistema de aquisição de dados necessita de procedimentos prévios para iniciar a gravação de dados da deformação: ligação dos cabos dos extensômetros circunferencial e axial nos canais 0 e 1, respectivamente; calibração do sistema de aquisição de dados por meio da entrada analógica de sinais como valor de engenharia no sistema de aquisição de dados que depende do valor da medida de deformação, do resistor de calibração, que pode ser de três tipos, R_{cal1} (medidas de deformação até $1 \cdot 10^{-3}$), R_{cal2} (medidas de deformação até $0,3 \cdot 10^{-3}$) e R_{cal3} (medidas de deformação até $0,1 \cdot 10^{-3}$), excitação dos extensômetros com 2,5 V (não é permitido superior a 5V), e limites superiores e inferiores da escala para não saturar a diferença de potencial $\pm 10V$, que é regulado pela entrada de ganho que pode ir até 5000, no sistema da marca Lynx. Nos ensaios, foram utilizados extensômetros tipo roseta e unidirecionais, em posição diametralmente oposta; então os canais 2 e 3 também simultaneamente passaram pelo mesmo procedimento dos canais 0 e 1. O canal 5 foi conectado a um transdutor de pressão, com faixa de operação entre 0 MPa a 4 MPa (40 bares) para monitorar a pressão durante o ensaio. Depois da estabilização dos valores de calibração, passou-se executar o processo de gravação dos dados para a quantidade de tempo necessária ao experimento, que pode ter duração maior que um dia. No processo de análise, podem-se obter gráficos das deformações circunferencial e axial, em função do tempo. O equipamento funciona ligado a um microcomputador, que realiza as tarefas de aferição de dados; compensação de temperatura; balanceamento da ponte de resistores; e leitura das medidas de deformações axial e circunferencial, com precisão de $0,1 \cdot 10^{-6}$. A Figura 3.20 mostra o sistema de aquisição de dados ligado ao microcomputador e a Figura 3.21 mostra mais detalhadamente os 16 canais por trás do sistema ADS 2000.

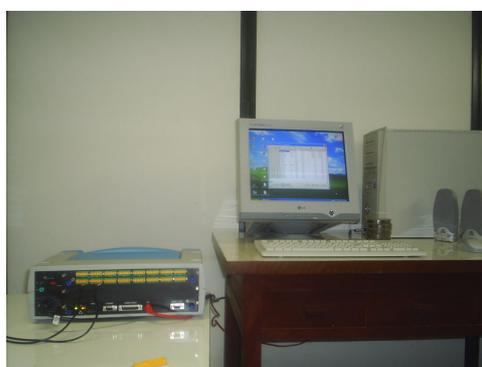


Figura 3.20 – Visão geral do equipamento ADS 2000, monitor e o microcomputador

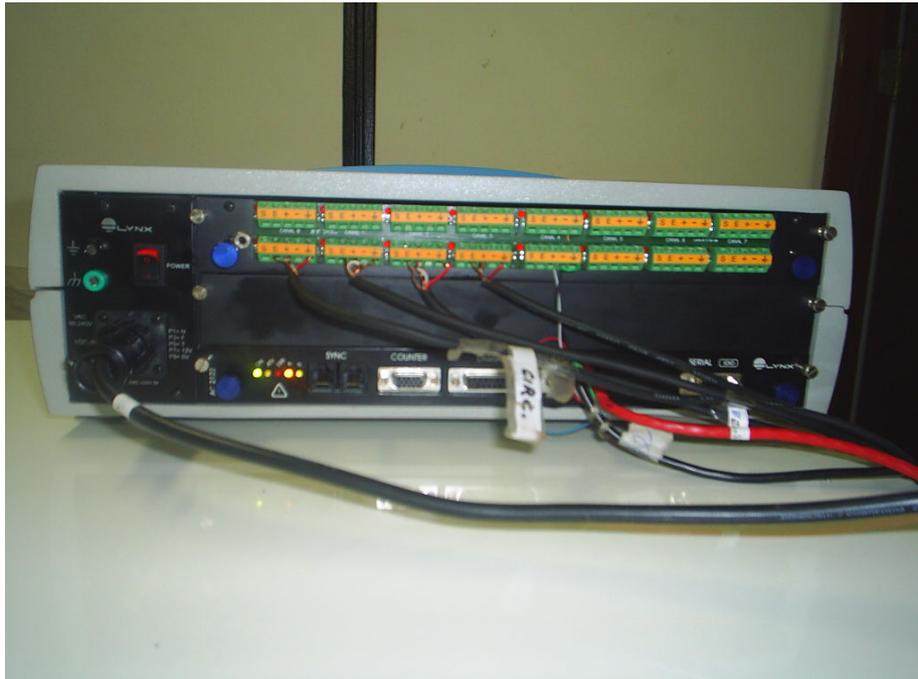


Figura 3.21 – Equipamento ADS 2000 de 16 canais operando com os canais de 0 a 4, ligados respectivamente a 4 extensômetros, e o canal 5 a um transdutor de pressão

3.6 – DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HIDRÁULICO DE PRESSÃO

A bomba hidráulica e o corpo de prova estão conectados por meio de uma mangueira, de 3m de comprimento e de diâmetro externo de 10 mm (3/8 in.), da marca Jason, que possui paredes de borracha reforçada com malha de aço, com capacidade de pressão até 15,5 MPa (155 bares). Ela é instalada através de conexões de cobre na entrada do tubo e na saída da bomba, que resistem até a mesma capacidade da mangueira, portanto muito superiores às pressões envolvidas nos ensaios dos corpos de prova que vão até no máximo 1,53 MPa (15,3 bares), cuja pressão é maior que a do tubo íntegro, que é de 1,38 MPa (13,8 bares). A bomba hidráulica, da marca Enerpac, tem potência de ½ HP, cuja capacidade é de 70 MPa (700 bares), portanto com capacidade para realizar os ensaios, inclusive dos corpos de prova de tubos de aço. A bomba hidráulica e a mangueira, em conjunto com a caixa de proteção para os ensaios, são mostradas na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Bancada de ensaios com a bomba hidráulica e a mangueira reforçada

3.7 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.7.1 - Considerações gerais

Após a preparação e instrumentação do corpo de prova, é feito o enchimento manual completo de óleo hidráulico pelo orifício de conexão do transdutor de pressão na tampa superior, na posição vertical, e mantém-se na mesma tampa o outro orifício de entrada da mangueira da bomba ainda aberto para retirar possíveis bolhas de ar do corpo de prova. Em ato contínuo a esses procedimentos preliminares, fecha-se o corpo de prova com a instalação de um transdutor de pressão, com faixa de operação até 4 MPa, na tampa metálica superior. Assim, o corpo de prova de PVC, agora na posição horizontal, conforme ilustrado na Figura 3.13, é fixado ao mancal de engastamento de um lado, por meio de parafusos, e no lado oposto fica apoiado com liberdade de deslocamento axial. Doravante, serão descritos para o tubo de alumínio e de PVC, os procedimentos quanto à pressurização interna e medidas das deformações.

3.7.2 - Corpo de prova de tubo íntegro de alumínio

O corpo de prova íntegro de alumínio (liga de Al-Mg-Si), com características geométricas idênticas aos de PVC, exceto pela espessura da parede, $t = 2,1$ mm, e com especificação 6063 – T5 apresenta propriedades físicas como densidade (d) e mecânicas, módulo de Young (E_{Al}), módulo de cisalhamento (G_{12}), coeficiente de Poisson (ν_{12}), resistência de escoamento à tração ($X_{TAI}=X_{CAI}$), e resistência ao cisalhamento (S_{12}), na Tabela 3.13. Adicionalmente, decidiu-se iniciar os ensaios com o tubo de liga de alumínio íntegro, tendo em vista que o alumínio não apresenta fluência significativa em temperaturas próximas a 25 °C, quando solicitado abaixo de tensão de escoamento. Isto se faz necessário para obter confiabilidade no primeiro ensaio de operação de calibração do sistema e mostrar que o equipamento de aquisição de dados ADS 2000 está em condições de fornecer os dados das deformações circunferenciais e longitudinais, bem como as respectivas pressões internas, em concordância com as simulações numéricas obtidas pelo COMPSHELL para tubo íntegro de alumínio (vide Figura 3.23). O procedimento de colagem e o adesivo das tampas de alumínio são os mesmos ao do tubo de PVC, nos dois extremos do tubo de alumínio (vide Figura 3.11).

Tabela 3.13 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6063 – T5 (Maia, 2003)

d (g/mm^3)	E_{Al} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12} -	X_{TAI} (MPa)	X_{CAI} (MPa)	τ_{12} (MPa)
0,0027	70307	26305	0,33	112	112	91



Figura 3.23 - Tubo íntegro de alumínio pressurizado até 0,6 MPa, no regime elástico

3.7.3 - Corpos de prova de tubos de PVC rígido (TI, TD e TR)

Os ensaios com os tubos de PVC branco foram realizados em duas configurações: (i) em tubos íntegros e desbastados e (ii) tubos reparados. Inicialmente, foram pressurizados e medidas as deformações, circunferencial e longitudinal, respectivamente, de todos os corpos de prova (CP), durante um intervalo de tempo, que para o CP nº 1 foi de cinco horas, submetendo-se à pressão constante para os ensaios, com os valores de 0,3 MPa e 0,6 MPa. No terceiro ensaio, do corpo de prova identificado como nº 1, fez-se o aumento contínuo da pressão até o momento da ruptura, que é mostrado na Figura 3.24. Para os CPs nºs 2 a 4, o pr ensaio no momento da ruptura do corpo de prova nº 3 pode ser visualizado na Figura 3.25.

Na segunda etapa, os tubos desbastados nºs 5 e 6 foram reparados com material compósito de uma camada de epóxi/vidro-E (tecido balanceado), de espessura 0,25 mm, na região central, sendo a resina curada, sem vácuo, na temperatura ambiente, entre 25 °C e 29 °C. O corpo de prova de tubo reparado nº 5 foi pressurizado até 0,3 MPa, a partir daí incrementando-se de 0,1 MPa até 1,2 MPa, em intervalos intercalados de pressão constante durante 10 minutos, e finalmente com incrementos de 0,1 MPa até o momento de ruptura, que é mostrado na Figura 3.26.



Figura 3.24 – CP nº1 de tubo íntegro de PVC rompido a $p = 1,4$ MPa

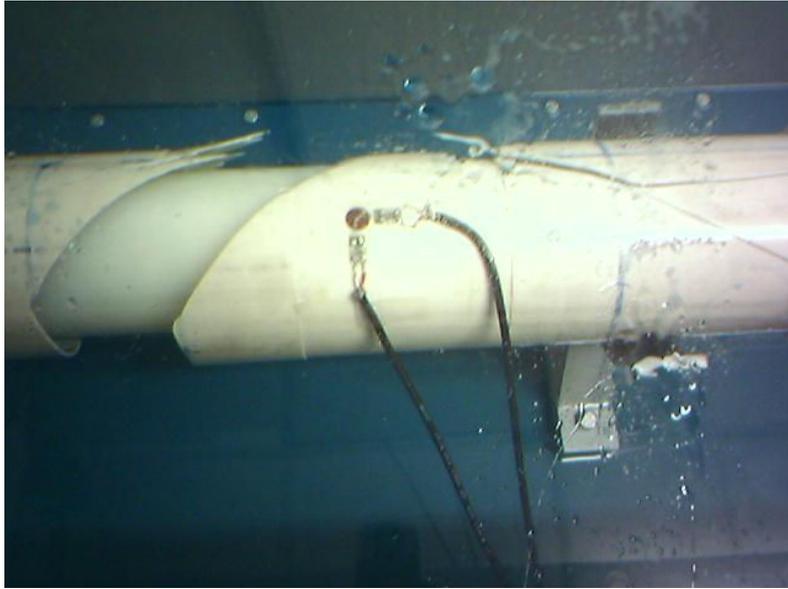


Figura 3.25 – CP n°3 de tubo desbastado de PVC rompido a $p = 0,75$ MPa

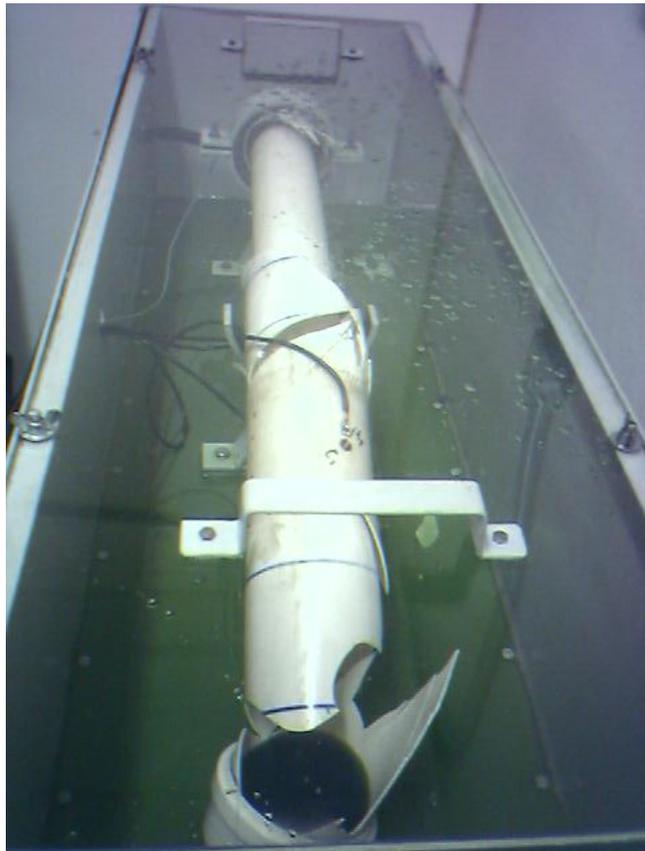


Figura 3.26 – CP n°5 de tubo reparado de PVC rompido a $p = 1,4$ MPa

4 – RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As propriedades mecânicas do PVC e de alguns materiais compósitos utilizados no COMPSHELL, que foram obtidas no Apêndice D, como os módulos de Young (E_{11} e E_{22}) e de cisalhamento no plano (G_{12}), o coeficiente de Poisson (ν_{12}), bem como os limites de resistência à tração (X_{T1} e X_{T2}), à compressão (X_{C1} e X_{C2}), e ao cisalhamento (S_{12}) são mostradas na Tabela 4.1. Inicialmente, foram realizadas simulações com as condições de contorno engastado do lado esquerdo e apoiado com liberdade de deslocamento axial (u) do direito, conforme detalhado no item 3.3.1. São utilizados para as simulações de tubos reparados os compósitos (matriz/fibra): Epóxi/Vidro-E e Epóxi/Algodão. As massas específicas (d) em g/cm^3 são dadas por: $\rho_{\text{epóxi}}=1,0$; $\rho_{\text{vidro-E}}=2,5$; $\rho_{\text{pvc}}=1,4$ e $\rho_{\text{algodão}}=1,5$. Os valores das frações volumétricas da Tabela 4.1 de matriz (v_m) e de fibra (v_f) são 67,5% e 32,5%, respectivamente, para compósitos de Epóxi/Vidro-E, de tecido balanceado ($0^\circ/90^\circ$) nas direções, longitudinal e circunferencial. No caso dos reparos com Epóxi/Algodão, o algodão nos laminados é apenas carga de enchimento.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas de PVC rígido (Albuquerque, 1990) e de reparos compósitos (Hull, 1981; Levy Neto, 1983)

Propriedade	E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}	X_{T1}	X_{C1}	X_{T2}	X_{C2}	S_{12}
Material	MPa	MPa	MPa	-	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Resina Epóxi	3500	3500	1296	0,35	65	882	65	882	841
Resina Poliéster	3000	3000	1087	0,38	35	100	35	100	50
Epóxi/Vidro-E	17475	17475	2293	0,25	298	311	298	311	53,59
Epóxi/Carbono	34478	34478	1998	0,21	274	769	274	769	125
PVC rígido	3000	3000	1071	0,40	42	42	42	42	13,8

Os dados da Tabela 4.1, bem como as características geométricas e condições de contorno dos tubos, são introduzidos no arquivo de entrada do COMPSHELL, conforme detalhados nos apêndices A e B, para os corpos de prova. O programa incrementa as pressões internas (p) até que, de acordo com o critério de falha de Tsai-Hill, a pressão de

falha (p_{rup}) é detectada e a análise de falha é concluída. O programa COMPSHELL, a cada incremento de pressão, calcula o índice de falha de todas as camadas, de todos os elementos da malha, e, no local mais crítico, aplica o critério de falha (Levy Neto, 1991). A Tabela 4.2 mostra os resultados retirados dos arquivos de saída quando o COMPSHELL finaliza a simulação para os corpos de prova TI, TD e TR, fornecendo a pressão hidrostática interna de ruptura (p_{rup}), bem como as posições de ruptura, longitudinal (s) e ao longo da espessura (z), nas condições de contorno já mencionadas anteriormente, portanto, daqui em diante, não se precisará especificá-las. Na Tabela 4.2, são apresentados os valores dos deslocamentos longitudinal (u) e radial (w) máximos (u_{max} e w_{max}) e, no local de ruptura, das resultantes de tensão circunferencial (N_{θ}) e de resultantes de momento fletor longitudinal (M_x), para $x=s$ e z , respectivamente.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos pelo COMPSHELL para os corpos de prova TI e TD

Esforços e deslocamentos	p_{rup}	N_{θ}	M_x	w_{max}	u_{max}	s	z
Corpos de prova	MPa	N/mm	N.mm	mm	mm	mm	mm
TI	1,71	83,56	-1,913	0,618	0,810	477,2	0,90
TD	0,88	43,53	-0,035	0,642	0,222	220,0	0,45

Os gráficos de deslocamento radial (w) e de esforços resultantes N_{θ} , M_x e M_{θ} , em função da posição longitudinal (x), de tubo íntegro (TI) para a pressão hidrostática interna (p) de 0,60 MPa, no regime elástico, são mostrados nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. Para a construção destes gráficos, foram utilizados os dados do arquivo de saída do COMPSHELL.

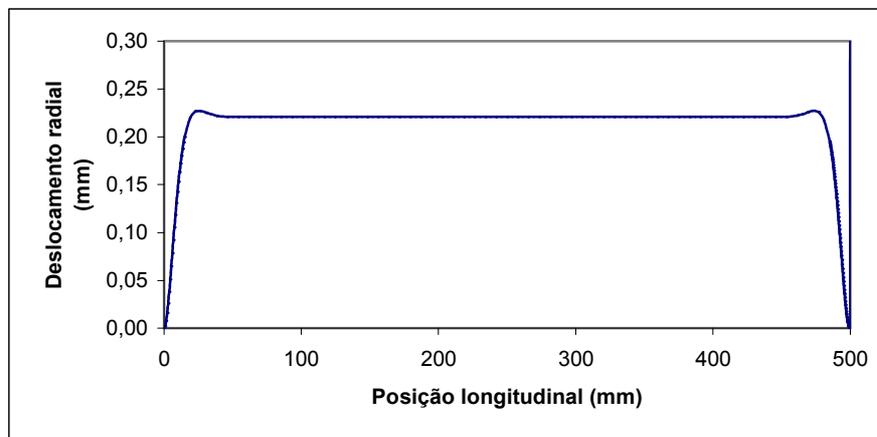


Figura 4.1 - Deslocamento radial (w) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa

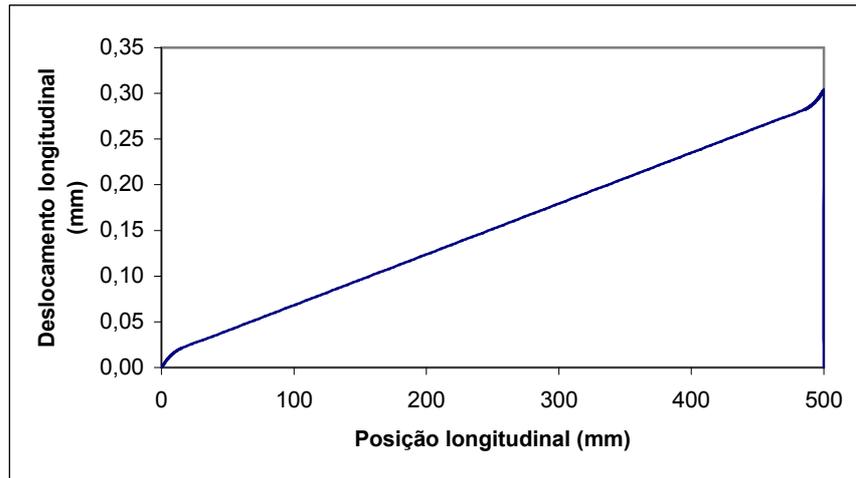


Figura 4.2 – Deslocamento longitudinal de tubo TI para $p = 0,60$ MPa

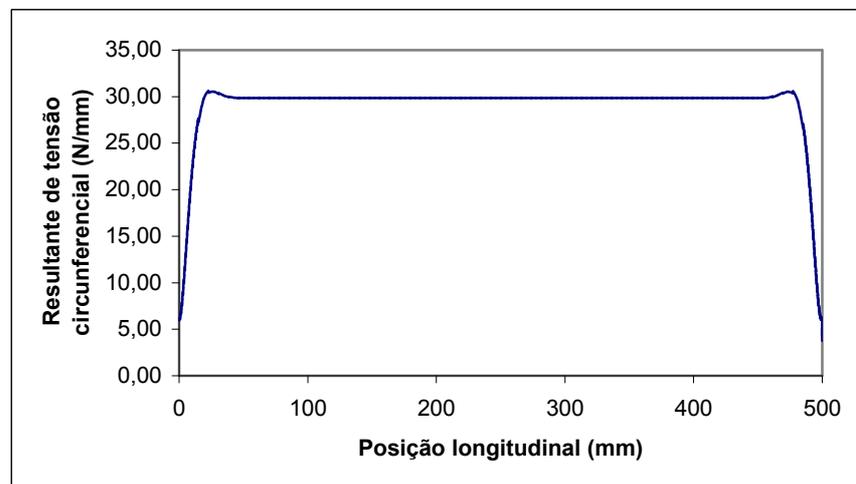


Figura 4.3 - Resultante de tensão circunferencial (N_{θ}) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa

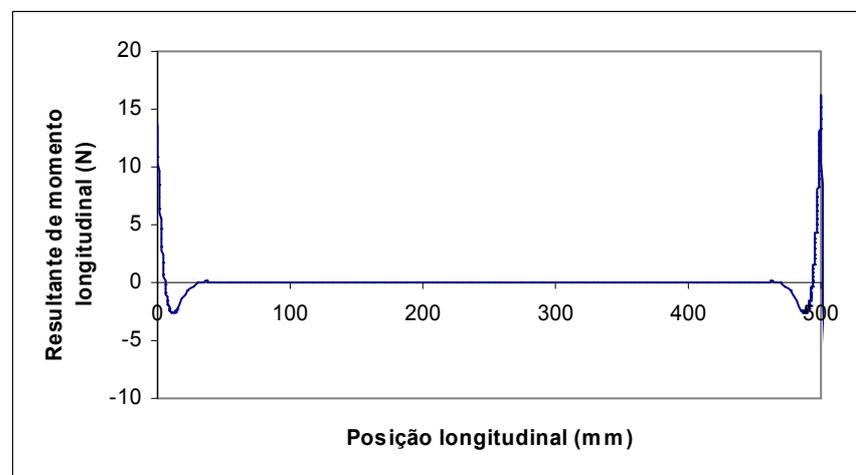


Figura 4.4 - Resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo TI para $p = 0,60$ MPa

Os gráficos de deslocamento radial (w) e de esforços resultantes N_θ e M_x , em função da posição longitudinal (s), de tubo desbastado (TD) nas condições de contorno (ii) para a pressão hidrostática interna (p) de 0,60 MPa, no regime elástico, são mostrados nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente. Na confecção destes gráficos, foram adotados os mesmos procedimentos que no tubo íntegro (TI).

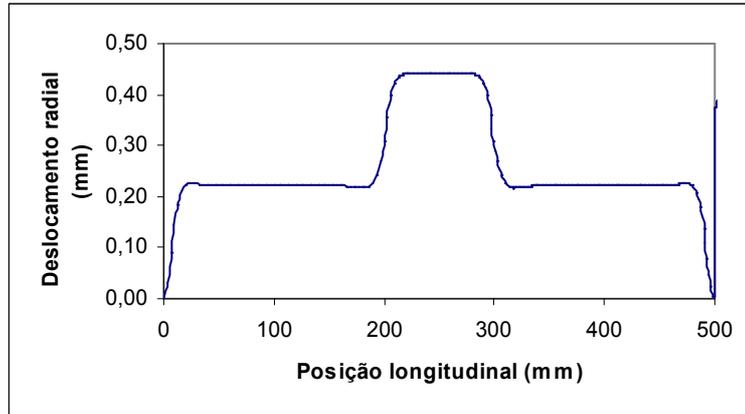


Figura 4.5 - Deslocamento radial (w) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa

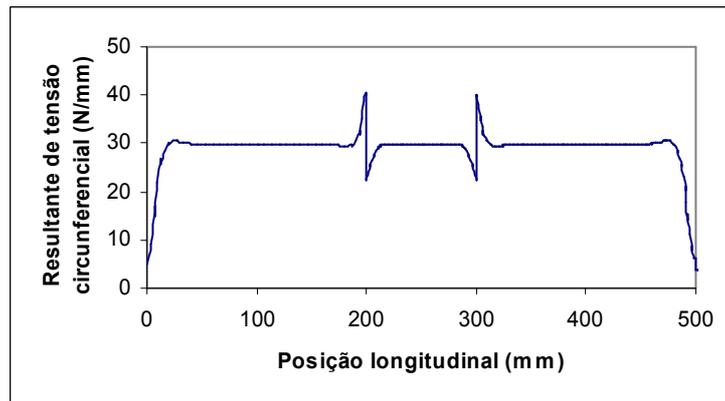


Figura 4.6 - Resultante de tensão circunferencial (N_θ) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa

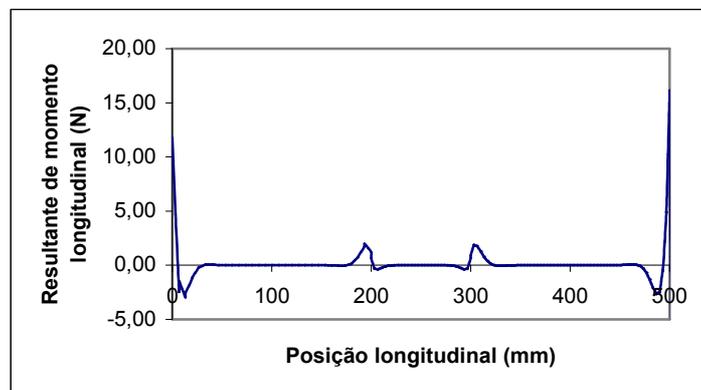


Figura 4.7 - Resultante de momento longitudinal (M_x) de tubo TD para $p = 0,60$ MPa

O trabalho de Maia (2003), sobre o comportamento elástico em tubos de alumínio com reparo compósito de Epóxi/Carbono, com metodologia semelhante, apresentou a expressão de espessura ideal de reparo (t_{reparo}) dada por $t_{\text{reparo}} = (E_{\text{tubo}}/ E_{\text{reparo}}) \cdot t_{\text{desbaste}}$. O módulo de Young circunferencial (E_{reparo}), i.e. $E_{\text{reparo}} = E_{22}$, e o módulo de Young circunferencial do tubo de PVC (E_{tubo}) de 3000 MPa, são encontrados na tabela 4.4. A Tabela 4.3 mostra o módulo de Young do reparo (E_{reparo}) e a espessura de reparo ideal (t_{reparo}) para os tubos reparados (TR) com a espessura de desbaste (t_{desbaste}) de 0,9 mm ($t_{\text{desbaste}} = 50\%$ de t), definida no modelamento dos tubos (TR) na Figura 3.10.

Tabela 4.3 - Espessura de reparo ideal para corpos de prova (TR) (Maia, 2003)

Código	Reparo Compósito	E_{reparo} (MPa)	t_{reparo} (mm)
TRC	Epóxi/Carbono	34478	0,08
TRV	Epóxi/Vidro-E	17475	0,16
TRE	Epóxi/Algodão	3500	0,77
TRP	Poliéster/Algodão	3000	0,90

Os gráficos de deslocamento radial (w), em função da posição longitudinal (x), de tubos reparados TER (epóxi/algodão) e TRV (epóxi/vidro-E) para $p = 0,60$ MPa, encontram-se nas figuras 4.8 e 4.9. Na confecção desses gráficos, utilizou-se o mesmo procedimento no COMPSHELL que nos casos anteriores, deixando-se somente uma camada de laminado que preenche o desbaste de extensão de 100 mm e espessura de 0,9 mm nos tubos reparados (TR).

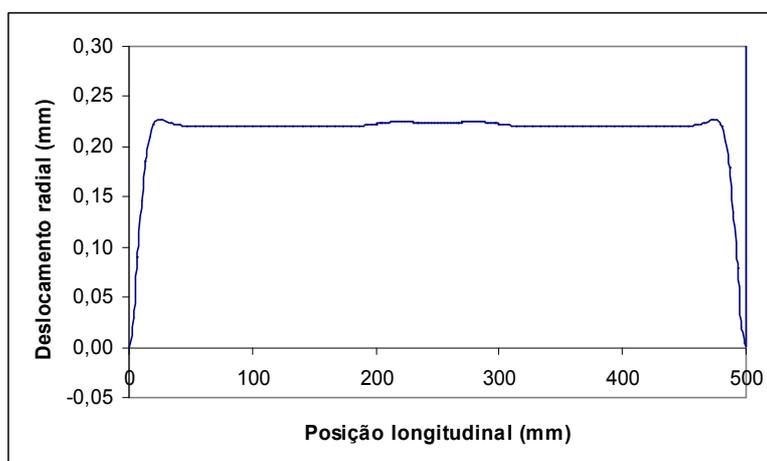


Figura 4.8 – Deslocamento radial de tubo TRE para $p = 0,60$ MPa

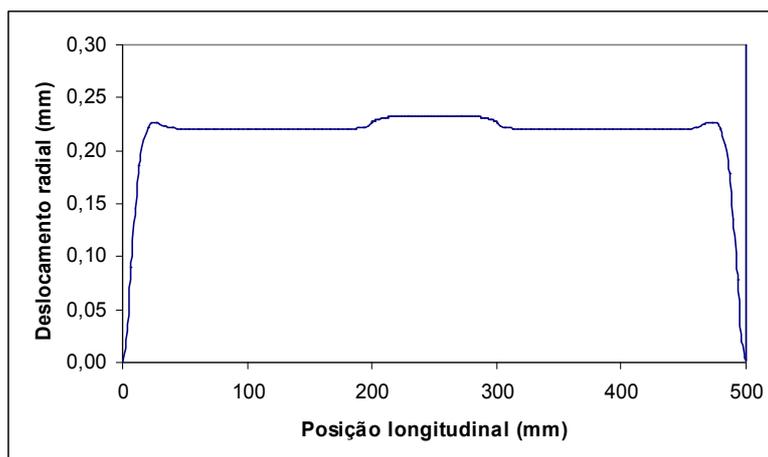


Figura 4.9 – Deslocamento radial de tubo TRV com espessura de reparo de 0,16 mm para $p=0,60$ MPa

A Tabela 4.4 apresenta, no local de ruptura, os esforços resultantes N_{θ} e M_{θ} , deslocamentos máximos, radial (w_{max}) e longitudinal (u_{max}), bem como as pressões de ruptura (p_{rup}), as coordenadas, longitudinal (s) e ao longo da espessura (z), com o respectivo número da camada, de tubos reparados TRV e TRE, com uma camada de reparo compósito de espessura ideal na região central, entre 200 mm e 300 mm.

Tabela 4.4 - Resultados do COMPSHELL de tubos TRV e TRE para pressão de ruptura

Esforços e deslocamentos	p_{rup}	N_{θ}	M_{θ}	w_{max}	u_{max}	s	z	Camada
Corpos de prova	MPa	N/mm	N	mm	mm	mm	mm	número
TRV	1,50 9	79,44	13,12	0,598	0,338	201,2	0,370	1
TRE	1,28 9	63,86	1,36	0,479	0,397	285	0,835	2

O gráfico da Figura 4.10, de deslocamento radial (w), em função da posição longitudinal (s), de tubo reparado TRV, mostra que o estrangulamento de tubos para o reparo de epóxi/vidro-E, de espessura de 0,25 mm, utilizado nos ensaios para pressão interna de 0,6 MPa, implicou uma diminuição do deslocamento radial de apenas 0,04 mm. Para a confecção deste gráfico, mantiveram-se no COMPSHELL as mesmas propriedades mecânicas da Tabela 4.1 e características dos corpos de prova da Figura 3.9.

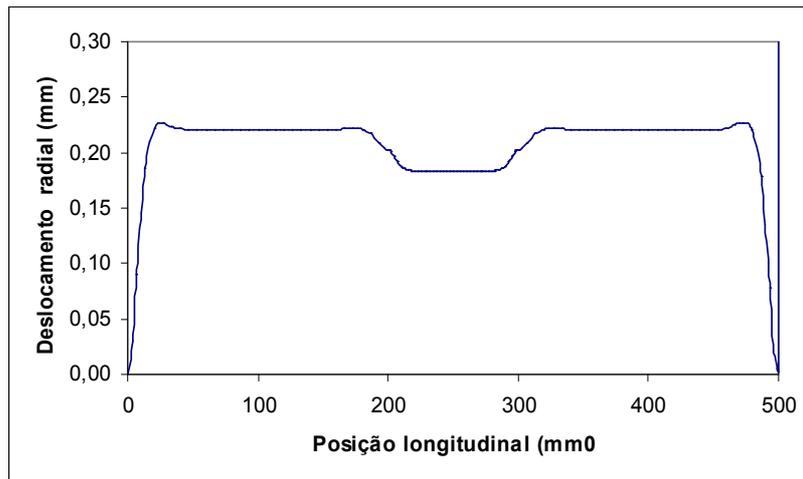


Figura 4.10 - Deslocamento radial de tubo TRV com espessura de reparo de 0,25 mm para $p = 0,60$ MPa

Na Tabela 4.5, mostra-se a diferença entre o deslocamento radial de tubo reparado (w_{tr}) e de tubo íntegro (w_{ti}), i.e. $\Delta w = w_{tr} - w_{ti}$, define a condição de recuperação das propriedades mecânicas de tubo íntegro (TI). Por convenção, trata-se a diferença entre estes deslocamentos radiais (Δw), na região central de posição longitudinal (s) entre 200 mm e 300 mm, como tubo perfeitamente, recuperado quando $\Delta w = 0$, tubo estrangulado se $w_{tr} < w_{ti}$ ($\Delta w < 0$), e tubo estufado se $w_{tr} > w_{ti}$ ($\Delta w > 0$). Foi estabelecido um índice para o grau de recuperação do tubo reparado (TR) em relação ao tubo íntegro (TI) na região central já definida, chamado de Índice de integridade (I) para o tubo reparado, dado em percentagem, sendo 0% quando o reparo compósito nenhum benefício traz à recuperação da integridade e 100% quando o reparo atingiu o objetivo deste trabalho, que é a recuperação total da integridade em relação ao tubo íntegro (TI). O Índice de integridade (I) é dado em função do módulo da razão da diferença dos deslocamentos radiais (Δw) e o deslocamento radial do tubo íntegro (w_{ti}), que é descrita por $I = 1 - |\Delta w/w_{ti}|$. Os deslocamentos radiais foram obtidos das figuras 4.8, 4.9 e 4.10 dos tubos TRE, TRV-0.16 e TRV-0.25, respectivamente, para pressão $p = 0,60$ MPa.

Tabela 4.5 – Índice de integridade de tubos TRV e TRE em relação ao tubo TI

Tubo reparado (TR)	w_{tr} (mm)	w_{ti} (mm)	$\Delta w = w_{tr} - w_{ti}$ (mm)	1 → estrangula $\Delta w < 0$ 2 → estufa $(\Delta w > 0)$ 3 → recupera $\Delta w = 0$	Índice de integridade (I) $I = 1 - \Delta w/w_{ti} $ (%)
TRE	0,224	0,220	0,004	2	98,18
TRV-0.16	0,232	0,220	0,012	2	94,55
TRV-0.25	0,180	0,220	-0,040	1	81,82

4.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS COMPLEMENTARES

Nesta subseção, serão apresentados os resultados da simulação numérica e os experimentais, ambos nas mesmas posições longitudinais (s) na região central, entre 200 mm e 300 mm, dos corpos de prova. Inicialmente, são apresentados, na Tabela 4.6, os resultados das deformações circunferencial e longitudinal de um corpo de prova de tubo íntegro de alumínio, conforme especificações dadas na Tabela 3.13, na posição $x = 250$ mm. E, de tubos de PVC rígido (numerados de 1 a 5), resultados equivalentes são mostrados nas tabelas 4.7 a 4.11 para deformações, circunferencial e longitudinal, no instante inicial, em que ocorreu a contribuição elástica do ensaio de retardação. Nas últimas linhas das tabelas 4.8 (CP nº 2) e 4.11 (CP nº5), adicionalmente, encontram-se estimativas pelo COMPSHELL de pressões de falha com o critério de Tsai Hill. A espessura de reparo, de epóxi/vidro-E, do CP nº5, na tabela 4.11, é de 0,25 mm.

Tabela 4.6 – Resultados do tubo íntegro de **alumínio** para posição $x = 250$ mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})
Pressão interna (MPa)				
0,2	55,8	6,0	58	13,6
0,3	83,6	9,0	84,8	18,8
0,6	167,3	18,8	169,2	37

Tabela 4.7 – Resultados do corpo de prova nº 1 (TI/PVC) para posição $x = 250$ mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})
Pressão interna (MPa)				
0,3	2218	150,76	1903,0	114,3
0,6	4424	303,2	4074,4	302,7

Tabela 4.8 – Resultados do corpo de prova nº 2 (TI/PVC) para posição x= 250 mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)
Pressão interna (MPa)				
0,3	2218	150,76	1836,5	94,4
0,6	4424	303,2	3940,4	309
1,7 / 1,4*	12354	1620,8	17853	856,5

* pressão de ruptura experimental

Tabela 4.9 – Resultados do corpo de prova nº 3 (TD/PVC) para posição x= 250 mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)
Pressão interna (MPa)				
0,2	2952	114,96	1726,0	264,1
0,3	4420	172,90	2722,0	375,7
0,6	8792	348,60	7483,0	775,5

Tabela 4.10 – Resultados do corpo de prova nº 4 (TD/PVC) para posição x= 250 mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)	Deformação circunferencial (10 ⁻⁶)	Deformação longitudinal (10 ⁻⁶)
Pressão interna (MPa)				
0,2	2952	114,96	2867,9	154,4
0,3	4420	172,90	6142,9	1949,0
0,6	8792	348,60	11940,07	570,14

Tabela 4.11 – Resultados do corpo de prova nº 5 (TRV, reparado com epóxi/vidro-E) para posição $x = 250$ mm

Resultados	COMPSHELL		EXPERIMENTAL	
	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})	Deformação circunferencial (10^{-6})	Deformação longitudinal (10^{-6})
Pressão interna (bar)				
0,2	1263,6	110,06	1247,0	243,4
0,3	1894,0	165,3	1766,0	346,6
0,4	2524,0	220,8	2376,0	475,6
0,5	3152,0	276,4	2933,0	618,0
0,6	3780,0	332,0	3450,0	761,7
1,70 / 1,42*	9996,0	946,0	15059	1509

* pressão de ruptura experimental

É importante mostrar também, na Tabela 4.12, as diferenças percentuais comparativas das deformações, circunferencial e longitudinal, para a pressão $p = 0,60$ MPa, no regime elástico, entre os resultados do COMPSHELL e do procedimento experimental, conforme as tabelas 4.7 a 4.11.

Tabela 4.12 – Comparação entre os resultados experimentais e os do COMPSHELL

Corpos de prova	(i) COMPSHELL em relação ao (ii) EXPERIMENTAL	
	Diferença na deformação circunferencial (%)	Diferença na deformação longitudinal (%)
	$\frac{100 \cdot [(i) - (ii)]}{(i)}$	$\frac{100 \cdot [(i) - (ii)]}{(i)}$
Tubo de alumínio	-1,12	-96,81
1 (PVC)	+7,90	+0,16
2 (PVC)	+10,93	-1,92
3 (PVC)	+14,89	-122,46
4 (PVC)	-35,81	-63,55
5 (PVC)	+8,73	-129,43

O CP n°1 (TI) apresentou durante os testes de cinco horas (300 min) um efeito de 4,4 % de deformação viscoelástica (linha azul), que é visualizado pelo gráfico de deformação circunferencial *versus* tempo na Figura 4.11 para $p = 0,6$ MPa.

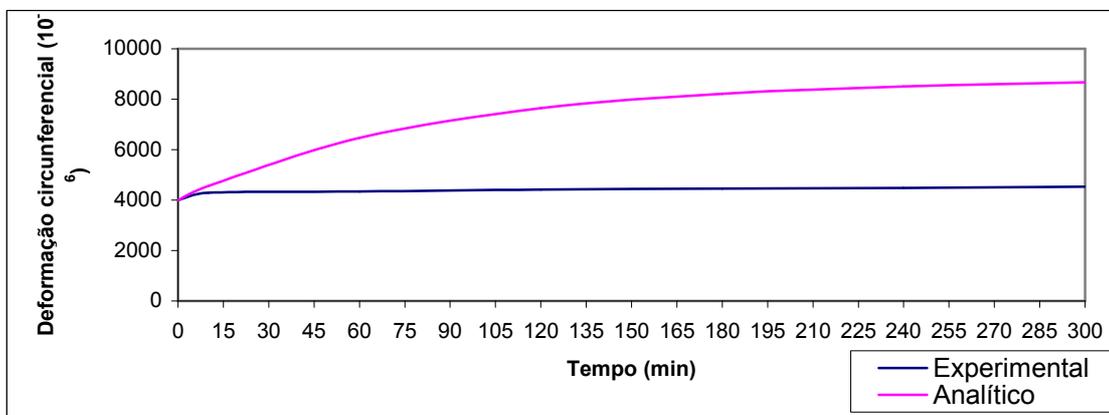


Figura 4.11 – Curvas comparativas do modelo de Burger e experimental de deformação circunferencial *versus* tempo do CP n°1 (TI)

As figuras 4.12 e 4.13 mostram as curvas de deformação circunferencial *versus* tempo, experimental e analítica pelo modelo de Burger (Apêndice E), de tubos íntegro (TI) e desbastado (TD), respectivamente. O ensaio de retardação, com pressão constante de 0,6 MPa, foi realizado com 15 minutos de duração, e logo a seguir, o ensaio de relaxação de mais 15 minutos, que se faz aliviando a pressão hidrostática. Observou-se que no CP n°1 a deformação circunferencial atinge mais de 90% de seu valor estabilizado, após 10 minutos.

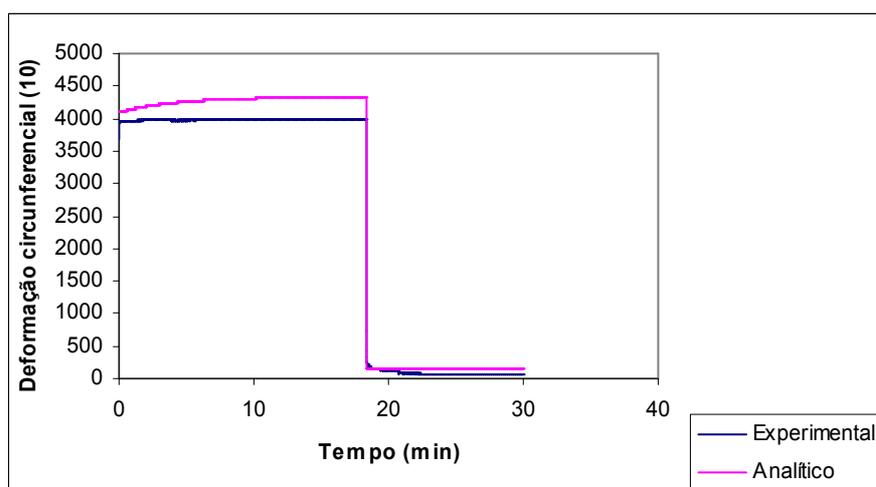


Figura 4.12 – Curvas comparativas do modelo de Burger e experimental de deformação circunferencial *versus* tempo do CP n°2 (TI)

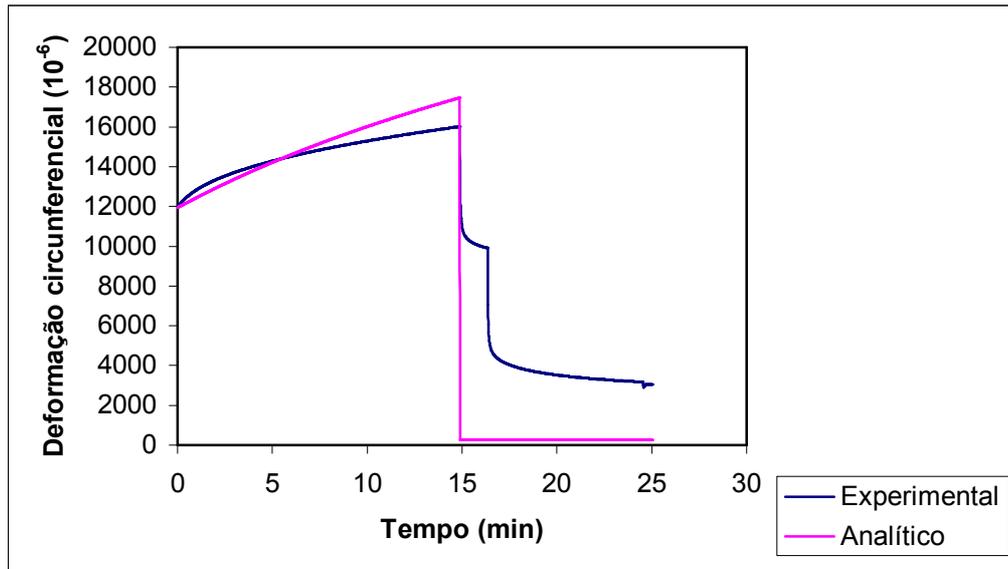


Figura 4.13 – Curvas comparativas do modelo de Burger e experimental de deformação circunferencial *versus* tempo do CP nº4 (TD)

O CP nº5 (TR), reparado com vidro-E/Epóxi, apresentou o gráfico da tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial, mostrado na Figura 4.14, obedecendo à lei de Hooke, com incremento de pressão hidrostática de 0,1 MPa, a partir de 0,2 MPa até 0,6 MPa; portanto, o fenômeno da viscoelasticidade foi desprezível na região do reparo compósito de epóxi/vidro-E.

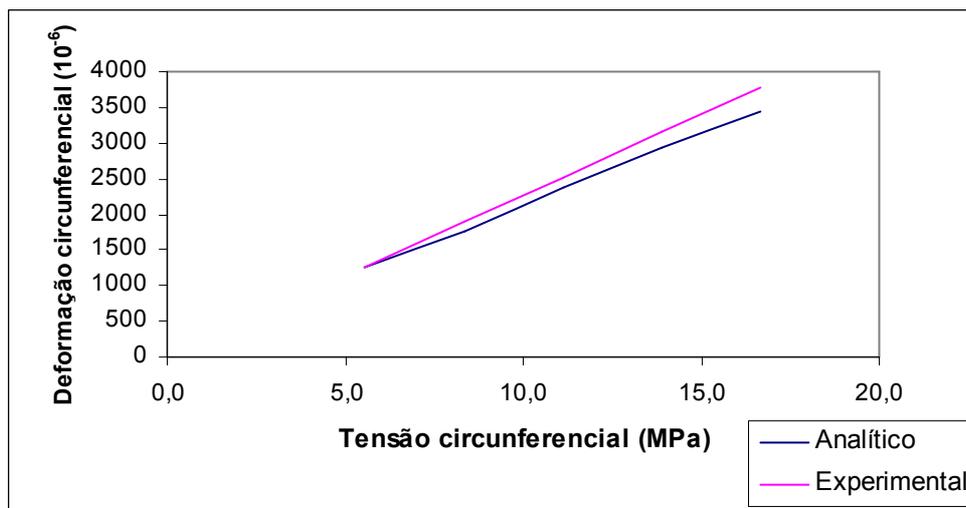


Figura 4.14 – Curvas comparativas de simulação no COMPSHELL e Experimental de tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial do CP nº5 (TR)

5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - SOLUÇÃO ANALÍTICA COMPARADA À SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TUBO ÍNTEGRO BIENGASTADO

A Teoria de Membrana, primeira e mais simples teoria de cascas delgadas, não considera os momentos fletores e torçores, e as resultantes de tensões atuantes podem ser obtidas através das equações de equilíbrio de forças. A Teoria de Membrana, no contexto de cilindros tampados nas extremidades e submetidos à pressão uniforme interna, é muito útil para estimarem-se as resultantes de tensão circunferencial e longitudinal (ou axial). Entretanto, as simulações de cilindros biengastados nas extremidades, realizadas usando-se o programa COMPSHELL, indicam que nos engastamentos aparecem picos de momentos fletores, circunferenciais e longitudinais, os quais podem controlar o mecanismo de falha dos tubos (Hartung, 1963).

A Teoria Clássica de Love, com aproximação de primeira ordem, considera os momentos fletores em cascas finas, mas assume que as seções transversais planas permanecem planas após a aplicação de tais momentos. Isto equivale a desprezarem-se as distorções devido ao cisalhamento transversal. Neste contexto, as distribuições de deformações normais ao longo da espessura (direção radial z) são assumidas como sendo lineares (Love, 1927 e Sanders, 1959). No programa COMPSHELL, é utilizada a Teoria de Cascas Finas de Novozhilov (1964). Por levar em conta deflexões moderadas, ela é considerada como um aperfeiçoamento em relação à Teoria Clássica de Love, na qual as deflexões são assumidas como sendo pequenas.

A teoria de Reissner, desenvolvida no capítulo 2, também mostra que é possível considerar os momentos fletores para tubos de parede fina (Kraus, 1967). Além disso, pode-se obter uma solução exata do problema (i.e. solução analítica fechada), no caso de se ter pressão interna distribuída uniformemente e para as condições de contorno de biengastamento. O capítulo 2 mostra a solução analítica para tubos íntegros de parede fina biengastados, de PVC rígido e de alumínio, fornecendo os deslocamentos radial e longitudinal, bem como resultantes de tensão normal e de momentos fletores, nas direções circunferencial e longitudinal, respectivamente. Os resultados sugerem que se pode trabalhar satisfatoriamente com a simulação pelo programa COMPSHELL, principalmente na posição longitudinal, $x = 250$ mm (centro do tubo), porque as diferenças percentuais

entre resultados da solução exata (Kraus, 1967) e da numérica de resultante de tensão circunferencial (N_{θ}) e deslocamento radial (w) de tubos íntegros são 0,4 % e 20,5 %, para PVC rígido, e 0,03 % e 16,36 % para alumínio 6063-T5, respectivamente, submetidos à pressão de 0,60 MPa. A Tabela 5.1 faz uma síntese das comparações entre a solução analítica e a numérica das resultantes de momentos fletores circunferenciais e longitudinais nas tampas, fornecendo os valores de pico pelo COMPSHELL, que ocorre na posição $x = 500$ mm. Os valores dessas resultantes de momentos fletores da solução numérica da Tabela 5.1 são superiores aos da Tabela 2.1. Os valores de pico da solução analítica do tubo íntegro de PVC ocorrem na posição longitudinal, $x = 500$ mm. A simulação numérica fornece o deslocamento radial (w), que permite determinar a deformação circunferencial (ϵ_c) por meio da razão entre o w e o raio do tubo (R), i.e. $\epsilon_c = w/R$. A simulação numérica do COMPSHELL, em comparação ao resultado experimental, apresentou diferenças percentuais de deformação circunferencial, nos primeiros instantes do experimento, inferiores ou iguais a 11 % para tubos íntegros de PVC rígido. Observando os resultados do deslocamento radial para os tubos íntegros de PVC rígido, mostra-se que o deslocamento radial na solução analítica é mais conservativo que o da solução numérica.

Tabela 5.1 – Comparação entre as soluções analítica e numérica de tubo íntegro de PVC e do alumínio das resultantes de momentos fletores nas tampas para $p = 0,60$ MPa

Tipo de tubo	PVC rígido		Alumínio (Al) – 6063T5	
	(i) M_{θ} ($x=500$ mm) [N]	(ii) M_x ($x=500$ mm) [N]	(i) M_{θ} ($x=500$ mm) [N]	(ii) M_x ($x=500$ mm) [N]
Solução analítica	-6,24	-15,61	-5,45	-18,18
Solução numérica	5,36	13,40	5,38	16,31
Diferenças percentuais [%] $\frac{100 \cdot [(i) - (ii)]}{ (i) }$	+14,10	+14,16	+7,00	+10,29

5.2 – PREVISÕES ESTIMADAS PELA SIMULAÇÃO NO COMPSHELL

É necessário fazer alguns esclarecimentos sobre a teoria e o modelamento utilizados para a simulação numérica pelo programa computacional COMPSHELL. O estudo com tubos fechados submetidos à pressão interna necessita um modelamento matemático

consistente das tampas. Houve avanço neste trabalho, em relação à metodologia de colagem de tampas metálicas, utilizado por Maia (2003), através da técnica de decapagem com ácido sulfúrico. Entretanto, é necessário entender melhor do comportamento mecânico das tampas quando submetidas à pressão interna, isto vale tanto para a superfície que recebe tensões normais quanto às de cisalhamento na região da colagem. Os corpos de prova, TI, TD e TR, em questão, são considerados longos, logo a Teoria da Membrana se aproxima da Teoria de Cascas Cilíndricas de Parede Fina no centro do tubo íntegro (Kraus, 1967). A tensão radial (σ_r) é considerada desprezível para tubos de parede fina, onde a razão entre o diâmetro (D) e espessura (t) é superior ou igual a 20, sendo D = 100 mm e t = 1,8 mm, i.e. D/t= 55,6 (Maia, 2003). O COMPSHELL, baseado na Teoria de Novozhilov, a qual coincide com a Teoria da Membrana, na posição longitudinal, x = 250 mm, para a pressão de 0,6 MPa, fornece as resultantes de tensão $N_x = 14,95$ N/mm e $N_\theta = 29,87$ N/mm. Estas, então, obedecem à relação $N_\theta \approx 2 \cdot N_x$ (Maia, 2003). A diferença percentual de resultante de tensão circunferencial (N_θ), no centro do tubo, entre a Teoria da Membrana e a do COMPSHELL de tubo TI, de PVC rígido, é de 0,4%, neste trabalho.

A previsão de ruptura do tubo TI, de acordo com as simulações no programa COMPSHELL, ocorre na posição longitudinal, x = 477,2 mm (vide Tabela 4.2), na superfície externa do tubo, z = 0,90 mm. Isto, provavelmente, acontece naquele lugar, devido à resultante de tensão circunferencial (N_θ), dividida pela espessura, t, ser superior à resistência à tração da parede do tubo (X_{T2}), i.e. $N_\theta / t > X_{T2}$ (vide Tabela 4.1). Existe próximo a essa posição longitudinal na Tabela 2.1, valor indicando valores elevados de resultantes de momento fletor tanto por simulação numérica quanto por solução analítica.

O tubo desbastado TD, da Tabela 4.2, apresenta a previsão de falha na posição longitudinal, x = 220 mm, e na posição ao longo da espessura do tubo (z), z = 0,45 mm. Logo, a ruptura ocorre na superfície externa da região desbastada, porque a resultante de tensão circunferencial (N_θ), dividida pela espessura, t, é superior à resistência à tração da parede do tubo (X_{T2}), i.e. $N_\theta / t > X_{T2}$ (vide Tabela 4.1). A Figura 4.6 para a pressão de 0,6 MPa, já indica os picos de resultante de tensão circunferencial na região interface entre as regiões íntegra e desbastada na posição longitudinal, x = 200 mm, sugerindo por simulação numérica onde pode ocorrer a falha em tubos desbastados.

Torna-se claro pelos resultados de tubos TR, que a recuperação da integridade mecânica (rigidez e resistência) em relação ao tubo TI, nas mesmas condições de contorno e pressão interna, pode ser realizada mudando o tipo de material dos reparos compósitos com suas espessuras ideais, respectivamente. A curva de deslocamento radial (w), na

Figura 4.5, para tubo TD, indica estufamento em relação à região íntegra para pressão de 0,60 MPa, que fornece na região central $w = 0,440$ mm. Para reduzir o deslocamento radial, é necessário um reparo na região central. As curvas de deslocamento radial (w) de tubo reparado (TR) para a pressão de 0,60 MPa, nas figuras 4.8 e 4.9, com reparos de Epóxi/Algodão e Epóxi/Vidro-E, respectivamente, mostram que os valores de deslocamento radial (w) na região central ficam próximos do tubo íntegro (TI). Os tubos TRE e TRV, com reparos de espessura 0,77 mm e 0,16 mm, recuperaram a integridade mecânica em relação ao tubo TI, o que pode ser verificado na Tabela 4.5, pelo índice I, de 98,18 % e 94,55 %, respectivamente, na posição longitudinal, $x = 250$ mm, em que o valor máximo seria igual a cem por cento, i.e. $I = 100\%$.

5.3 – MODELO DE BURGER COMPARADO AOS EXPERIMENTOS

Os corpos de prova TI e TD, de PVC rígido, apresentaram o fenômeno da viscoelasticidade. Neste trabalho foi adotado o modelo de Burger (Gandur, 1998). Para se comparar os resultados experimentais com os analíticos de Burger, foram realizados os ensaios de retardação e relaxação. Foram definidos, na Tabela 3.6, dois corpos de prova para cada tipo de tubo, TI, TD e TR, para verificar se os dois tipos de ensaios são reproduzíveis. A partir deste ponto se fará somente a análise e discussão de resultados experimentais em relação à deformação circunferencial, e na Tabela 4.12 se mostra claramente que são mais uniformes do que os da deformação longitudinal.

A parcela de contribuição da viscoelasticidade na deformação circunferencial, observada no ensaio de retardação da Figura 4.11, de tubo TI nº1, de duração de cinco horas, foi de 12,5 % e 4,4 % em relação à parcela elástica (valor inicial da deformação) para as pressões de 0,3 MPa e 0,6 MPa, respectivamente. No tubo TI nº1, observou-se também que, com 15 minutos de ensaio de retardação, seria possível conseguir um valor de mais de 90% da deformação viscoelástica alcançada com um mesmo tipo de ensaio de cinco horas. Todos os ensaios de retardação e de relaxação para os tubos TI e TD tiveram, por meio dessa observação, duração de 15 minutos. Nos resultados experimentais do tubo TI nº2, apresentou-se o gráfico da Figura 4.12, devido à pequena contribuição de viscoelasticidade de 7,99 % em relação à parcela elástica da deformação circunferencial para pressão de 0,6 MPa. O tubo TD nº3, o primeiro a se constatar o fenômeno da viscoelasticidade com o PVC rígido, que na Tabela 4.10 mostrou resultados que não estão de acordo com o modelo de Burger para pressão de 0,6 MPa, merece ser analisado no

futuro. O tubo TD nº4, da Figura 4.13, mostra nos resultados experimentais que a contribuição de viscoelástica é apenas de 13,76 % em relação à parcela elástica da deformação circunferencial para pressão de 0,6 MPa. Na Tabela 5.2, faz-se uma síntese dos resultados experimentais e da simulação numérica do modelo de Burger, para os tubos TI nº2 e TD nº4 das figuras 4.11 e 4.12, no centro dos tubos ($x = 250$ mm), considerando na direção circunferencial a deformação elástica no tempo inicial, e a viscoelástica, referente aos 15 minutos do ensaio de retardação para pressão de 0,6 MPa.

Tabela 5.2 – Comparação entre os resultados experimentais e analíticos de tubos íntegro (TI nº2) e desbastado (TD nº4) para $p = 0,6$ MPa

Tubo	TI nº2		TD nº4	
	Experimental	Analítica	Experimental	Analítica
Deformação circunferencial elástica (10^{-6})	3940	4095,9	11940,07	11940,07
viscoelástica (10^{-6})	3990	4328,5	16016,40	17466,31

As diferenças percentuais entre os resultados experimentais e os analíticos, da deformação circunferencial elástica e viscoelástica para pressão interna de 0,6 MPa nos tubos TI nº2 foram de 3,96 % e 8,48 %, respectivamente, conforme dados obtidos da Tabela 5.2. E para a mesma pressão no tubo TD nº4, esses valores de deformação circunferencial foram 0 % e 9,05 %, respectivamente. Ainda, são melhores os resultados para o tubo TRV para pressões além daquelas mostradas na Tabela 4.14, onde a verificação da deformação foi observada durante 15 minutos para cada pressão de 0,2 MPa a 1,1 MPa, com acréscimo de 0,1 MPa entre uma medida e outra. Portanto, no caso de tubo TRV, de reparo compósito de 0,25 mm de espessura, o efeito da viscoelasticidade não foi observado nas deformações tanto circunferenciais quanto longitudinais, com os extensômetros fixados na superfície do reparo na posição longitudinal, $x = 250$ mm.

O tubo de alumínio, por apresentar comportamento elástico, foi mais fácil de lidar, seguindo uma rotina de teste de toda a metodologia, antes de começar os ensaios mais complicados, com os tubos de PVC. Assim se verificou a calibração do equipamento de aquisição de dados. Além disso, o funcionamento do sistema hidráulico de pressão, bem como a metodologia de colagem das tampas e extensômetros. Pela Tabela 4.6, verificou-se que o tubo de alumínio apresentou resultados experimentais da deformação circunferencial

concordantes com os da simulação feita através do programa COMPSHELL. Entretanto, os resultados experimentais da deformação longitudinal continuam com valores bem superiores a 10 % tanto o tubo de alumínio como os de PVC rígido, em relação aos numéricos do COMPSHELL, o que é ilustrado na Tabela 4.12 para a pressão de 0,6 MPa. Existem fatores que podem induzir discordância entre os resultados numéricos e experimentais da deformação longitudinal inicial, i.e. a contribuição elástica, alguns podem ser citados: (i) efeito de flexão no centro do tubo devido à soma do peso próprio adicionado ao peso do óleo hidráulico dentro do tubo, que é indispensável para realização do experimento; e (ii) os efeitos da viscoelasticidade na deformação foram estudados por meio do modelo de Burger, em que o parâmetro responsável pela viscosidade na região inicial ξ_2 é uma função logarítmica que cresce rapidamente com valores iniciais do tempo de ensaio e ainda depende simultaneamente dos outros parâmetros η_1 , η_2 e ξ_1 que variam conforme a curva experimental fornecida pelo sistema de aquisição de dados. Existem outros modelos que podem auxiliar na compreensão do que acontece nos primeiros instantes de pressurização do corpo de prova até a pressão desejada, porque neste trabalho consideramos desprezíveis os efeitos da viscoelasticidade durante a pressurização do corpo de prova. Entretanto mesmo sabendo que o tempo gasto para pressurizar foram inferiores a 15% do tempo necessário para os ensaios de retardação, que foram em média de 15 minutos, alguma deformação viscoelástica deve ter ocorrido inicialmente. Para finalizar são necessários estudos mais aprofundados com outros modelos como o de Zener e outros mais generalizados utilizando as associações dos modelos de Maxwell e Kelvin.

Foi verificado que o aumento de pressão interna nos ensaios de retardação, com valores inferiores á de ruptura, mostrou melhores resultados para as deformações circunferenciais.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O reparo compósito considerado ideal para tubos de parede fina de PVC rígido, de acordo com os resultados experimentais, os quais apresentaram boa correlação com os previstos pelo programa de elementos finitos COMPSHELL, é o de matriz epóxi reforçado com tecido balanceado (0°/90°) de fibra de vidro-E, curado a frio e sem a utilização de bomba de vácuo. Para pressões crescentes até 0,60 MPa tem-se diferenças percentuais de no máximo 9 % entre os valores simulados pelo COMPSHELL e os experimentais. Este tipo de reparo apresentou um Índice de integridade (I) de 81,82 % em relação ao tubo íntegro até a pressão de 0,6 MPa. Com isso, foi possível reduzir-se, significativamente, tanto a tendência de o trecho reparado estufar, por falta de rigidez, bem como de ocorrer estrangulamento, devido ao excesso de rigidez. Isto também foi verificado por Maia (2003), em tubos de liga de alumínio 6063-T5.

A curva deformação circunferencial *versus* tensão circunferencial do tubo reparado com fibra de vidro-E, no trecho reparado, apresentou-se linear com um valor de discrepância máxima de 9,57 % entre os resultados do COMPSHELL e os experimentais para pressões de até 0,6 MPa. E, na continuação dos ensaios, a tendência linear desta curva foi observada através dos valores de deformações se manterem constantes, para cada pressão aplicada durante 10 minutos, incrementando-se progressivamente em 0,1 MPa, até alcançar 1,1 MPa. Após a constatação que o tubo reparado de PVC rígido, reforçado com fibra de vidro-E, obedeceu à lei de Hooke, garantiu-se que o comportamento viscoelástico pode ser desprezado, no trecho reparado.

6.2 – CONCLUSÕES

- 1 – Para tubos íntegros de PVC rígido ($D/t = 55,6$) e Al ($D/t = 47,6$), nos modelos analíticos e numéricos, que assumem engastamentos nas extremidades, os picos de momentos fletores circunferenciais e meridionais ocorrem nas extremidades;
- 2 – Os dos picos de momentos fletores longitudinais (M_x) de tubos íntegros ($L/R = 10$), comentadas no item 1 destas conclusões e calculados pelos modelos elásticos analíticos e numéricos, para PVC rígido e alumínio, ocorreram na tampa, na posição

longitudinal 500 mm. As diferenças percentuais dos momentos fletores longitudinais entre os modelos são inferiores a 14,2 %, visualizados na Tabela 6.1;

Tabela 6.1 – Comparação entre os resultados analíticos e numéricos dos picos de momentos fletores longitudinais de tubo íntegro de PVC e Al

Tubo	PVC rígido		Alumínio (Al)		Dif. Percentuais (%) $100 \cdot \frac{ (i) - (ii) }{ (i) }$	
	(i) Analítico	(ii) Numérico	(i) Analítico	(ii) Numérico	PVC	Al
Resultante de momento longitudinal M_x (N)	-15,61	13,40	-18,18	16,31	+14,16	+10,29

- 3 – As correlações entre os resultados numéricos e experimentais da deformação circunferencial, em valores percentuais, no tubo íntegro de alumínio, conforme as características geométricas do modelo elástico, i.e. $D/t = 47,6$ e $L/R = 10$ variaram de -1,12 a -3,79 para pressões respectivas de 0,6 MPa a 0,2 MPa.
- 4 – Os tubos de PVC íntegros e desbastados apresentaram viscoelasticidade. Os resultados experimentais das deformações circunferenciais apresentaram razoável correlação com o modelo de Burger, com erro máximo entre -35,81 % e +7,90 %.
- 5 – As deformações circunferenciais experimentais apresentaram uma melhor correlação com as simulações numéricas do que as deformações longitudinais.

6.3 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1 – Estudar os mecanismos de falha de tubos de PVC rígido de parede fina;
- 2 – Desenvolver modelos viscoelásticos de Kelvin e de Maxwell generalizados para PVC rígido e outros materiais poliméricos utilizados em tubos de parede fina;
- 3 – Estudar o comportamento mecânico de tubos reparados de PVC rígido de matriz epóxi com carga de enchimento de tecido de algodão;
- 4 – Estudar metodologia de tubos de PVC com reparos para parede grossa;
- 5 – Desenvolver modelos elásticos para tubos metálicos de parede grossa;
- 6 – Desenvolver modelos mais detalhados de tampas metálicas, incluindo os sulcos preenchidos com adesivo epóxi.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA Technology Consulting, **Temporary/permanent pipe repair - Guidelines**. In: Offshore Technology Report, 038, HSE Books, Oxfordshire, UK, 2001, 60p.
- ALBUQUERQUE, Jorge Artur C., **O Plástico na Prática**, cap.7, p.91-94, Sagra Ltda, Porto Alegre, 1990.
- ALVES FILHO, A., **Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE**, Érica, São Paulo, 2000.
- ANTHONY KELLY, F.R.S., **Table 1 – Physical properties of textile fibers**, In: Concise Encyclopedia of Composite Materials, p. 94, Pergamon Press, Cambridge, 1989.
- BARRA, G., **Compósitos Poliméricos EMC 5706**, 2004, 27p. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br>. Acesso em 14 mar.2005.
- CANEVAROLO, Jr; S.V., **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo, Artliber Editora, 2002.
- CHRISTENSEN, R.M., **Theory of Viscoelasticity: An Introduction**, p.245, Academic Press, Inc., London, 1971.
- CRAWFORD, R.P., **Plastics Engineering**, 3ª ed., cap.2, p. 41-167, Butterworth Heinemann, 1998.
- GANDUR, M.C., Tese de Doutorado em **Comportamento Complexo em Despelamento de Fitas Adesivas**, cap.2, p.6-66, Universidade de Campinas, 2001.
- GORNI, A. A., **Introdução aos plásticos**, 2003, 16p. Disponível em: <http://www.gorni.eng.com/intropol.htm> Acesso em 24 abr.2005.
- HARTUNG, R.F., **Planar Wound Filamentary Pressure Vessels**, AIAAJ.1, pp. 2842, 1963.
- HOA, S.V., **Analysis for Design of Fiber Reinforced Plastic Vessels and Pipings**, cap.1-4, p.1-366, Technomic Publishing Inc., EUA, 1991.
- HULL D., **An Introduction to Composite Materials**, cap.10, p. 231-135, Cambridge, 1981.
- HUNTSMAN, **Manual de Sistemas Epóxi Araldite para Laminação**, Maxiepoxi Ltda., São Paulo, 2005.
- JONES, R.M., **Mechanics of Composite Materials**, MC Grawn Hill, New York, 1975.

- KRAUS, H., **Thin Elastic Shells: An Introduction to the Theoretical Foundations and the Analysis of their Static and Dynamic Behavior**, cap.5, p.121-139, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- LEVY NETO, F., Tese de Doutorado em **The Behaviour of Externally-Pressurized Composite Domes**, cap.4, p. 122-134, University of Liverpool, 1991.
- LEVY NETO, F., Dissertação de Mestrado em **Estudo da Falha ao Impacto de uma Estrutura de Material Conjugado usada em Aeronaves**, cap.3, p. 47, Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São Paulo, 1983.
- LOVE, A.E.H., **Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity**, 4ª ed., Dover, New York, 1927.
- MAIA, G. C., Dissertação de Mestrado em **Comportamento Elástico de Cilindros com e sem Reparo Circunferencial de Carbono/Epóxi**, p.51-77, Programa de pós-graduação de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2003.
- MATWEB Material Property Data, Propriedades de Tubo de PVC Rígido, Automation Creations Inc.. Disponível em: www.matweb.com. Acesso em 5ago.2005.
- MISTRY, J. e Levy Neto, F., **A Procedure For Analyzing the Strength of Composite Domes by Axisymmetric Shell Finite Elements**, Composites Engineering, vol.3, Nº1, p. 169-180, 1994.
- MOAVENI, S., **Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS**, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- MONAGHAN, D., **FEA Information**. Disponível em: www.dermotmonaghan.com. Acesso em 17jul.2002.
- NOVOZHILOV, V.V., **The Theory of Thin Shells**, 2ª ed., Noordhoff, Groningen, Holanda, 1964.
- PARDINI, L.C., **Tratamento Superficial de Alumínio**. Notas pessoais de aula, registradas em 11 nov.2005.
- PIRATELLI FILHO, A., **Manual dos Equipamentos do Laboratório de Metrologia**, vol. II, apêndice II, p.162, Universidade de Brasília, 1976.
- RABELLO, M., **Aditivação de Polímeros**. São Paulo, Artliber Editora, 2000.
- SANDERS, J.L.Jr., **An Improvement First Aproximation Theory for Thin Shells**, NASA Theoretical Report R-24, 1959.
- SÁRKÖZI, Z. e Ohmacht, R., **Műszaki Táblázatok**, 3ª ed., p.473-490, Editora Tánácsics, 1961.

SES, **Pipeline**. In: Boletim eletrônico, Stress Engineering Systems Inc.. Disponível em: www.ses.com. Acesso em 25 ago.2002.

TELLES, P.C. da S., **Tubulações Industriais Materiais, Projeto e Montagem**, 9ª ed., p.1-3, editora LTC, 1996.

A –ARQUIVO DE ENTRADA DO COMPSHELL DE TUBO ÍNTEGRO

A entrada de dados no COMPSHELL foi realizada por uma rotina de perguntas, que devem ser preenchidas pelo usuário fornecendo os valores no sistema de unidades definido pelo programa. O arquivo de entrada apresentado é do tubo íntegro TI nº2, submetido à pressão hidrostática interna de 0,6 MPa.

```
1      Analysis (1:static, 2:stability,3:buckling,4:fequency)?
n      Do you want to print strains & stresses(Y/N) ?
      Failure criterion ? (1:Max. stress, 2:Max. strain,
3      3:Tsai-Hill, 4:Hoffman, 5:Tsai-Wu stress,
4      6:Tsai-Wu strain, 7:Owen, 8:All) ?
4      Number of segments ?
0.000000E+00 Starting x co-ord. of the structure ?
5.000000E+01 Starting r co-ord. of the structure ?
*****Segment No. 1*****
1.0      Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
20.0     Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
1.850000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
y      Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1      Number of layers ?
y      Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
1.800000E+00 Thickness ?
3.000000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
3.000000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
4.000000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.071400E+03 Shear Modulus, G12 ?
4.200000E+02 Ultimate strength in tension, X1T ?
4.200000E+02 Ultimate strength in compression, X1C ?
4.200000E+02 Ultimate strength in tension, X2T ?
4.200000E+02 Ultimate strength in compression, X2C ?
2.000000E+02 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
*****Segment No. 2*****
1.0      Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
60.0     Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
3.150000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
y      Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1      Number of layers ?
y      Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
```

1.800000E+00 Thickness ?
3.000000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
3.000000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
4.000000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.071400E+03 Shear Modulus, G12 ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X1T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X1C ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X2T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X2C ?
2.000000E+01 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
*****Segment No. 3*****
1.0 Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
60.0 Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
5.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
n Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1 Same as which segment ?
*****Segment No. 4*****
1.0 Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
10.0 Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
5.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
0.000000E+00 r co-ord. of the end of the segment ?
y Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1 Number of layers ?
y Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
1.500000E+01 Thickness ?
3.500000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
3.500000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
3.500000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.296300E+03 Shear Modulus, G12 ?
1.000000E+05 Ultimate strength in tension, X1T ?
1.000000E+05 Ultimate strength in compression, X1C ?
1.000000E+05 Ultimate strength in tension, X2T ?
1.000000E+05 Ultimate strength in compression, X2C ?
5.000000E+04 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
*****Segment 1*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 2*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 3*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 4*****

1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
Ring load multipliers at junction 1
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 2
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 3
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 4
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 5
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
1 Number of Load/pressure history points ?
6.000000E-01 Point 1 load
5.0 Increments ?
0.000000E+00 Rotational speed (rad/s) of the shell about the axis ?
y Are there any constraints at junction 1 ?
0 u : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of u ?
0 v : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of v ?
0 w : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of w ?
0 Rotation : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of Rotation ?
n Are there any constraints at junction 2 ?
n Are there any constraints at junction 3 ?
n Are there any constraints at junction 4 ?
y Are there any constraints at junction 5 ?
1 u : (1 free, 0 constrained) ?
0 v : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of v ?
0 w : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of w ?
0 Rotation : (1 free, 0 constrained) ?
0.000000E+00 Prescribed value of Rotation ?

B – ARQUIVO DE ENTRADA DO COMPSHELL DE TUBO REPARADO

A entrada de dados no COMPSHELL foi realizada por uma rotina de perguntas, que devem ser preenchidas pelo usuário, fornecendo os valores no sistema de unidades definido pelo programa. O arquivo de entrada apresentado é do tubo reparado TRV nº5, submetido à pressão hidrostática interna de 0,6 MPa.

```
1      Analysis (1:static, 2:stability,3:buckling,4:fequency)?
n      Do you want to print strains & stresses (Y/N) ?
      Failure criterion ? (1:Max. stress, 2:Max. strain,
3      3:Tsai-Hill, 4:Hoffman, 5:Tsai-Wu stress,
      6:Tsai-Wu strain, 7:Owen, 8:All) ?
6      Number of segments ?
0.000000E+00 Starting x co-ord. of the structure ?
5.000000E+01 Starting r co-ord. of the structure ?
      *****Segment No. 1*****
1.0     Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
30.0    Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
2.000000E+01 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
y       Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1       Number of layers ?
y       Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
2.000000E+01 Thickness ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
4.000000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.000000E+03 Shear Modulus, G12 ?
4.200000E+02 Ultimate strength in tension, X1T ?
4.200000E+02 Ultimate strength in compression, X1C ?
4.200000E+02 Ultimate strength in tension, X2T ?
4.200000E+02 Ultimate strength in compression, X2C ?
1.000000E+02 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
      *****Segment No. 2*****
1.0     Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
40.0    Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
2.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
y       Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1       Number of layers ?
y       Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
```

1.800000E+00 Thickness ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
4.000000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.000000E+03 Shear Modulus, G12 ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X1T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X1C ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X2T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X2C ?
1.000000E+01 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
*****Segment No. 3*****
1.0 Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
40.0 Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
3.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
y Is the composition of this segment new (Y/N) ?
2 Number of layers ?
y Layer : 1 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
9.000000E-01 Thickness ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E11 ?
2.800000E+03 Youngs Modulus, E22 ?
4.000000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
1.000000E+03 Shear Modulus, G12 ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X1T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X1C ?
4.200000E+01 Ultimate strength in tension, X2T ?
4.200000E+01 Ultimate strength in compression, X2C ?
1.000000E+01 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?
y Layer : 2 New properties (Y/N) ?
1.400000E-06 Density ?
2.500000E-01 Thickness ?
1.640000E+04 Youngs Modulus, E11 ?
1.640000E+04 Youngs Modulus, E22 ?
2.600000E-01 Poissons ratio (nu12, smaller of the two) ?
2.162200E+03 Shear Modulus, G12 ?
2.780000E+02 Ultimate strength in tension, X1T ?
2.950000E+02 Ultimate strength in compression, X1C ?
2.780000E+02 Ultimate strength in tension, X2T ?
2.950000E+02 Ultimate strength in compression, X2C ?
1.000000E+01 Shear strength, S12 ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E1T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression E1C ?
1.000000E+00 Ultimate strain in tension, E2T ?
1.000000E+00 Ultimate strain in compression, E2C ?
1.000000E+00 Ultimate in-plane shear strain, E12 ?
0.000000E+00 Winding angle ?

```

*****Segment No. 4*****
1.0      Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
40.0     Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
4.800000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
n        Is the composition of this segment new (Y/N) ?
2        Same as which segment ?
*****Segment No. 5*****
1.0      Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
30.0     Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
5.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
5.000000E+01 r co-ord. of the end of the segment ?
n        Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1        Same as which segment ?
*****Segment No. 6*****
1.0      Type (1: cone/cylinder, 2: toroid/sphere) ?
10.0     Number of elements in the segment ?
1.000000E+00 Step ratio (>1 for incr. and <1 for decr) ?
5.000000E+02 x co-ord. of the end of the segment ?
0.000000E+00 r co-ord. of the end of the segment ?
n        Is the composition of this segment new (Y/N) ?
1        Same as which segment ?
*****Segment 1*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 2*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 3*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 4*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 5*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
*****Segment 6*****
1.000000E+00 Pressure multiplier (at start) ?
1.000000E+00 Pressure multiplier (at finish) ?
Ring load multipliers at junction 1
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 2
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 3
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
0.000000E+00 Radial load multiplier ?
0.000000E+00 Moment load multiplier ?
Ring load multipliers at junction 4
0.000000E+00 Axial load multiplier ?
0.000000E+00 Circum. load multiplier ?

```

0.000000E+00 Radial load multiplier ?
 0.000000E+00 Moment load multiplier ?
 Ring load multipliers at junction 5
 0.000000E+00 Axial load multiplier ?
 0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
 0.000000E+00 Radial load multiplier ?
 0.000000E+00 Moment load multiplier ?
 Ring load multipliers at junction 6
 0.000000E+00 Axial load multiplier ?
 0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
 0.000000E+00 Radial load multiplier ?
 0.000000E+00 Moment load multiplier ?
 Ring load multipliers at junction 7
 0.000000E+00 Axial load multiplier ?
 0.000000E+00 Circum. load multiplier ?
 0.000000E+00 Radial load multiplier ?
 0.000000E+00 Moment load multiplier ?
 1 Number of Load/pressure history points ?
 6.000000E-01 Point 1 load
 5.0 Increments ?
 0.000000E+00 Rotational speed (rad/s) of the shell about the axis ?
 y Are there any constraints at junction 1 ?
 0 u :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of u ?
 0 v :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of v ?
 0 w :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of w ?
 0 Rotation :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of Rotation ?
 n Are there any constraints at junction 2 ?
 n Are there any constraints at junction 3 ?
 n Are there any constraints at junction 4 ?
 n Are there any constraints at junction 5 ?
 n Are there any constraints at junction 6 ?
 y Are there any constraints at junction 7 ?
 1 u :(1 free, 0 constrained) ?
 0 v :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of v ?
 0 w :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of w ?
 0 Rotation :(1 free, 0 constrained) ?
 0.000000E+00 Prescribed value of Rotation ?

C – ALGORITMO EM MATLAB 6.0 DA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Esta rotina mostra como se obter os gráficos de distribuição de resultante de momento longitudinal em tubo de PVC rígido de parede fina, utilizando os parâmetros na subseção 2.2.1.2 da solução analítica de Kraus, que é semelhante aos de distribuição de deslocamento radial. O mesmo foi realizado para o tubo íntegro de alumínio. Quando aparece o símbolo “%” é para fazer comentários explicativos que não entram nos cálculos da rotina apresentada.

```
% Gráfico de distribuição de momento longitudinal de um tubo biengastado com pressão interna distribuída uniforme
```

```
% Definições de parâmetros do tubo de PVC rígido
```

```
% L=comprimento do tubo
```

```
% R=raio do tubo
```

```
% t=espessura
```

```
% R/t=27,8
```

```
% x=variável de posição
```

```
% Mx=momento fletor em relação ao eixo x
```

```
% Escolha dos parâmetros
```

```
% t=1,8;
```

```
R=50;
```

```
% Cálculo de resultante de momento fletor Mx entre x=0 e x=L/2
```

```
% Para L/R=4
```

```
L=200;
```

```
d=3.47*(L/R)
```

```

x(1)=1;
for i=1:100
    x(i+1)=1-i*0.01;
    if x(i+1)>=0
        if x(i+1)<=0.99
            Mx1(i+1)=-((sin(d)*cosh(d)+cos(d)*sinh(d))*sinh(d*x(i+1))*sin(d*x(i+1)))/
((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d))+((sin(d)*cosh(d)-
cos(d)*sinh(d))*cosh(d*x(i+1))*cos(d*x(i+1)))/
((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d)));
        end;
    end;
end;
% Para L/R=6
L=300;
d=3.47*(L/R)
x(1)=1;
for i=1:100
    x(i+1)=1-i*0.01;
    if x(i+1)>=0
        if x(i+1)<=0.99
            Mx2(i+1)=-((sin(d)*cosh(d)+cos(d)*sinh(d))*sinh(d*x(i+1))*sin(d*x(i+1)))/
((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d))+((sin(d)*cosh(d)-
cos(d)*sinh(d))*cosh(d*x(i+1))*cos(d*x(i+1)))/
((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d)));
        end;
    end;
end;

```

```

    end;

end;

% Para L/R=8

L=400;

d=3.47*(L/R)

x(1)=1;

for i=1:100

    x(i+1)=1-i*0.01;

    if x(i+1)>=0

        if x(i+1)<=0.99

            Mx3(i+1)=-((sin(d)*cosh(d)+cos(d)*sinh(d))*sinh(d*x(i+1))*sin(d*x(i+1)))/
(sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d))+((sin(d)*cosh(d)-
cos(d)*sinh(d))*cosh(d*x(i+1))*cos(d*x(i+1)))/
(sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d));

        end;

    end;

end;

% Para L/R=10

L=500;

d=3.47*(L/R)

x(1)=1;

for i=1:100

    x(i+1)=1-i*0.01;

    if x(i+1)>=0

        if x(i+1)<=0.99

```

```

Mx4(i+1)=-((sin(d)*cosh(d)+cos(d)*sinh(d))*sinh(d*x(i+1))*sin(d*x(i+1)))/
((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d))+((sin(d)*cosh(d)-
cos(d)*sinh(d))*cosh(d*x(i+1))*cos(d*x(i+1)))/((sinh(d)*cosh(d)+sin(d)*cos(d)));
end;
end;
end;
figure(5)
plot(x,Mx1,'b',x,Mx2,'r',x,Mx3,'g',x,Mx4,'bl')
axis([0 1 -1 0.4])
xlabel('(x/R)/(L/2R)')
ylabel('Mx/(2u^2DxpR^2/Et)')

```

D – ALGORITMO EM MATLAB 6.0 DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE REPAROS COMPÓSITOS

Foram necessários os dados das propriedades mecânicas de vários tipos de laminados compósitos para os arquivos de entrada do COMPSHELL. Esta rotina, criada por Roberson Fernando Silva (2005), colaborador do projeto de parceria entre a Universidade de Brasília (UnB) e a Eletronorte, chamado “Aplicações de Materiais Compósitos para Reparo de Tubulações Industriais”, fornece opções para todos os tipos de laminados mencionados neste trabalho. Toda vez que aparecer o símbolo “%” significa que se está indicando um texto para explicar o que se está calculando e também quando uma fórmula não é usada.

% Propriedades mecânicas dos compósitos

% Determinação do volume de fibra do compósito

Vf = 0.325;

Vm = 1-Vf;

% Propriedades das matrizes

% Resina epóxi (Levy, 1983; Hull, 1981)

Em = 3500;

Gm = 1280;

nim = 0.35;

XTm = 35;

XCm = 100;

S12m = 50;

rom = 0.0013;

% Resina poliéster (Hull,1981)

%Em = 2000;

%Gm = 729,9;

%nim = 0.37;

%XTm = 40;

%XCm = 90;

%S12m = 45;

%rom = 0.0014;

% Propriedades das fibras

% Fibra de vidro-E (Levy, 1983)

Ef = 72000;

Gf = 29508;

nif = 0.22;

XTf = 3450;

Xcomp = 965;

S12f = 63;

rof = 0.0026;

% Propriedades do compósito Vidro-E/Epóxi tecido Vf=0.5. (Cranfield, 1990)

Vfc = 0.5;

Vmc = 0.5;

E1c = 25000;

E2c = 25000;

G12c = 4000;

ni12c = 0.20;

X1Tc = 440;

X1Cc = 425;

X2Tc = 440;

X2Cc = 425;

S12c = 40;

% Fibra de Carbono

%Ef = 228000;

%Gf = 95000;

%nif = 0.2;

%XTf = 3800;

%Xcomp = 1308;

%S12f = 90;

%rof = 0.00181;

% Propriedades do compósito Carbono/Epóxi tecido Vf=0.5. (Cranfield, 1990)

%Vfc = 0.5;

%Vmc = 0.5;

%E1c = 70000;

%E2c = 70000;

%G12c = 5000;

%ni12c = 0.10;

%X1Tc = 600;

%X1Cc = 570;

%X2Tc = 600;

%X2Cc = 570;

%S12c = 90;

% Kevlar

%Ef = 112000;

%Gf = 41000;

%nif = 0.36;

%XTf = 3000;

%Xcomp = 248;

%S12f = 56;

%rof = 0.00144;

% Propriedades do compósito Kevlar/Epóxi Vf=0.5.

%Vfc = 0.5;

%Vmc = 0.5;

%E1c = 30000;

%E2c = 30000;

%G12c = 5000;

%ni12c = 0.20;

%X1Tc = 480;

%X1Cc = 190;

%X2Tc = 480;

%X2Cc = 190;

%S12c = 50;

% Determinação das propriedades do compósito com tecido não-balanceado

% Vfe=Vf/2;

% Fração de volume efetiva

% R = (1+Vmc/Vfc)*Vf;

% Constante para cálculo

% E11 = R*E1c+(1-R)*Em;

% Modulo de elasticidade na direção 1

% E22 = Em*E2c/((1-R)*E2c+R*Em);

% Modulo de elasticidade na direção 2

```

% ni12 = (1-R)*nim+R*ni12c;          % Coeficiente de Poisson do compósito
% G12 = Gm*G12c/((1-R)*G12c+R*Gm); % Modulo de cisalhamento
% X1T = R*X1Tc+(1-R)*XTm;           % Tensão de ruptura a tração na direção 1
% X1C = R*X1Cc+(1-R)*XCm;           % Tensão de ruptura a compressão na direção 1
% X2T = XTm*X2Tc/((1-R)*X2Tc+R*XTm); % Tensão de ruptura à tração na direção 2
% X2C = XCm*X2Cc/((1-R)*X2Cc+R*XCm); % Tensão de ruptura à compressão na
direção 2
% S12 = (S12f*S12m)/(Vm*S12f+Vf*S12m); % Tensão de ruptura ao cisalhamento
% ro = rom*Vm+rof*Vf;                % Densidade do compósito
% t = 200000/(E11)*1,4;               % Espessura do reparo para tubo de aço
% t = 70307/(E11)*1,4;               % Espessura do reparo para tubo de alumínio
% t = 2800/(E11)*1,4;               % Espessura do reparo para tubo de PVC
% Determinação das Propriedades do Compósito com tecido balanceado
R = (1+Vmc/Vfc)*Vf;                  % Constante para cálculo (Levy, 1983)
E11=R*E1c+(1-R)*Em;                 % Módulo de elasticidade na direção 1 (Levy, 1983)
E22=E11;                             % Módulo de elasticidade na direção 2
ni12=(1-R)*nim+R*ni12c;            % Coeficiente de Poisson
G12 = Gm*G12c/((1-R)*G12c+R*Gm);   % Modulo de cisalhamento
X1T = R*X1Tc+(1-R)*XTm;             % Tensão de ruptura à tração na direção 1
X1C = R*X1Cc+(1-R)*XCm;             % Tensão de ruptura à compressão na direção 1
X2T=X1T;                             % Tensão de ruptura à tração na direção 2
X2C=X1C;                             % Tensão de ruptura à tração na direção 2
S12 = (S12f*S12m)/(Vm*S12f+Vf*S12m); % Tensão de ruptura ao cisalhamento
ro = rom*Vm+rof*Vf;                 % Densidade do compósito
% t = 200000/(E11)*1,4;             % Espessura do reparo para tubo de aço

```

```
%      t = 70307/(E11)*1,4;          % Espessura do reparo para tubo de alumínio
      t = 2800/(E11)*1,4;          % Espessura do reparo para tubo de PVC
```

```
% Apresentação dos resultados ao usuário
```

```
disp([' Este material compósito '])
disp([' Apresenta as seguintes propriedades:'])
disp([' '])
disp([' E11 = ',num2str(E11) ' MPa'])
disp([' E22 = ',num2str(E22) ' MPa'])
disp([' G12 = ',num2str(G12) ' MPa'])
disp([' ni12 = ',num2str(ni12)])
disp([' X1T = ',num2str(X1T) ' MPa'])
disp([' X1C = ',num2str(X1C) ' MPa'])
disp([' X2T = ',num2str(X2T) ' MPa'])
disp([' X2C = ',num2str(X2C) ' MPa'])
disp([' S12 = ',num2str(S12) ' MPa'])
disp([' ro = ',num2str(ro) ' g/mm^3'])
disp([' t = ',num2str(t) ' mm' ' (Espessura do reparo)'])
```

**E - TABELA DE DADOS EM EXCEL DAS CURVAS EXPERIMENTAL
E ANALÍTICA DA DEFORMAÇÃO CIRCUNFERENCIAL VS.
TEMPO DO CP (TI) N°2**

Esta tabela de dados gerou as curvas analítica (modelo de Burger) e experimental de deformação circunferencial *versus* tempo do tubo íntegro de PVC N°2 da Figura 4.12. Esta planilha em Excel possibilitou a obtenção da deformação circunferencial em células definidas a partir de parâmetros dependentes tanto de propriedades geométricas das tabelas 3.2 a 3.4 quanto das propriedades mecânicas da curva experimental da Figura 4.13, além daquelas obtidas da Tabela 3.1. Cada parâmetro previamente calculado em célula específica foi usado com a especificação da posição de sua célula na expressão analítica da deformação circunferencial determinado em outra célula. Assim, consegue-se montar uma coluna de valores analíticos ao lado da coluna de deformação experimental obtida do sistema de aquisição de dados ADS 2000. Finalmente, obtém-se o gráfico desejado selecionando as colunas de tempo e de deformações circunferenciais experimental e analítica, e logo a seguir dando instruções no Excel por meio de comandos necessários para realização desta tarefa. A mesma rotina no Excel foi utilizado nos gráficos do capítulo 4 (figuras 4.11 e 4.13), de deformação circunferencial para o tubo íntegro N°1 e o desbastado N°4.

Parâmetros do modelo de Burger	
p=pressão de retardação (MPa)	0,60
R=raio do tubo (mm)	50,00
h=espessura da parede do tubo (mm)	1,80
t=tempo após a estabilização da curva (min)	18,30
Zetac=parâmetro geométrico da curva circunferencial depois de 10 min (min-1)	0,00
Zetaa=parâmetro geométrico da curva axial depois de 10 min (min-1)	0,00
Epsilon1c=deformação circunferencial no instante t=0 min	0,00
Epsilon1a=deformação axial no instante t=0 min	0,00
Epsilon2c=dif.entre a def.circ.total e def.circ.em t=0 min	0,00
Epsilon2a=dif.entre a def.axial.total e def.axial.em t=0 min	0,00
Epsilonc=deformação circunferencial final do ensaio de retardação em t=18,32 min	0,00
Epsilona=deformação axial final do ensaio de retardação em t=18,32 min	0,00
Sigma0c= p*R/h tensão circunferencial (MPa)	16,67
Sigma0a=p*R/(2*h) tensão axial (MPa)	8,33
E1c=Sigma0c/Epsilon1c módulo de elasticidade circunferencial inicial (MPa)	4069,11
E1a=Sigma0a/Epsilon1a módulo de elasticidade axial inicial (MPa)	30513,85
E2c=Sigma0c/Epsilon2c módulo de elasticidade circunferencial final (MPa)	72212,59
E2a=Sigma0a/Epsilon2a módulo de elasticidade axial final (MPa)	334672,02
Eta1c=Sigma0c/Zetac viscosidade circunferencial inicial (MPa.min)	129032258,06
Eta1a=Sigma0a/Zetaa viscosidade axial inicial (MPa.min)	97943192,95
Eta2c=t*E2c/log(1/(1+(E2c/E1c)+(E2c/Eta1c)*t-(E2c/Sigma0c)*Epsilonc)) viscosidade circunferencial final (MPa.min)	288453,02
Eta2a=t*E2a/log(1/(1+(E2a/E1a)+(E2a/Eta1a)*t-(E2a/Sigma0a)*Epsilona)) viscosidade axial final (MPa.min)	2209342,45

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
0,00	3672,37	4095,90	309,07	4152,6	372,4	3192,1	245,7	5,6
0,02	3940,95	4096,86	337,29	4463,6	405,7	3418,3	268,9	6,0
0,03	3941,55	4097,82	333,96	4467,0	402,0	3416,0	265,9	5,9
0,05	3941,56	4098,78	331,78	4468,2	399,5	3414,9	264,1	5,9
0,07	3945,04	4099,73	330,98	4475,2	397,9	3414,9	264,1	5,9
0,08	3946,19	4100,68	330,06	4476,3	396,5	3416,0	263,6	5,9
0,10	3945,61	4101,62	328,91	4475,2	394,9	3416,0	262,9	5,9
0,12	3949,07	4102,56	328,57	4479,8	394,0	3418,3	263,1	5,9
0,13	3947,91	4103,49	328,11	4477,5	393,3	3418,3	262,9	5,9
0,15	3949,65	4104,43	327,88	4481,0	392,4	3418,3	263,4	5,9
0,17	3950,78	4105,35	326,96	4479,8	391,0	3421,8	262,9	5,9
0,18	3950,80	4106,28	326,39	4482,1	390,1	3419,5	262,7	5,9
0,20	3951,36	4107,20	325,93	4481,0	389,4	3421,8	262,5	5,9
0,22	3950,21	4108,11	325,70	4479,8	388,7	3420,6	262,7	5,8
0,23	3951,94	4109,03	325,93	4481,0	388,7	3422,9	263,1	5,8
0,25	3953,65	4109,93	326,04	4481,0	388,5	3426,3	263,6	5,8
0,27	3954,23	4110,84	326,04	4482,1	387,8	3426,3	264,3	5,8
0,28	3954,80	4111,74	326,04	4482,1	387,3	3427,5	264,8	5,8
0,30	3955,37	4112,64	325,92	4482,1	387,3	3428,6	264,5	5,8
0,32	3957,10	4113,53	325,81	4484,5	386,4	3429,8	265,2	5,8
0,33	3954,80	4114,42	325,92	4482,1	386,9	3427,5	265,0	5,8
0,35	3956,53	4115,31	325,69	4484,5	385,9	3428,6	265,4	5,8
0,37	3955,94	4116,19	325,69	4482,1	385,9	3429,8	265,4	5,8
0,38	3955,37	4117,07	325,46	4482,1	385,5	3428,6	265,4	5,8
0,40	3956,52	4117,94	325,35	4483,3	385,0	3429,8	265,7	5,8
0,42	3958,24	4118,82	325,69	4483,3	385,0	3433,2	266,4	5,8
0,43	3958,25	4119,68	325,92	4485,6	385,0	3430,9	266,8	5,8
0,45	3957,67	4120,55	325,92	4483,3	384,8	3432,0	267,0	5,8
0,47	3957,67	4121,41	326,15	4483,3	384,6	3432,0	267,7	5,8
0,48	3958,83	4122,27	326,15	4485,6	384,1	3432,0	268,2	5,8
0,50	3958,25	4123,12	325,80	4484,5	383,7	3432,0	268,0	5,8
0,52	3959,97	4123,97	326,03	4485,6	384,1	3434,3	268,0	5,8
0,53	3959,96	4124,82	326,15	4484,5	383,7	3435,5	268,6	5,8
0,55	3960,53	4125,66	326,38	4484,5	383,7	3436,6	269,1	5,8
0,57	3959,96	4126,50	326,61	4484,5	384,1	3435,5	269,1	5,8
0,58	3960,53	4127,33	326,49	4484,5	383,7	3436,6	269,3	5,8
0,60	3963,41	4128,17	326,49	4486,8	383,4	3440,0	269,6	5,8
0,62	3962,84	4129,00	327,06	4487,9	383,9	3437,8	270,2	5,8
0,63	3961,69	4129,82	327,18	4486,8	383,4	3436,6	270,9	5,8
0,65	3961,11	4130,64	326,84	4485,6	383,4	3436,6	270,2	5,8
0,67	3961,68	4131,46	326,83	4485,6	382,7	3437,8	270,9	5,8
0,68	3962,25	4132,28	326,38	4485,6	382,3	3438,9	270,5	5,8
0,70	3962,24	4133,09	327,06	4484,5	382,7	3440,0	271,4	5,8
0,72	3961,10	4133,90	327,18	4484,5	382,7	3437,8	271,6	5,8
0,73	3961,11	4134,70	327,29	4485,6	382,7	3436,6	271,9	5,8
0,75	3964,56	4135,51	327,52	4487,9	382,7	3441,2	272,3	5,8
0,77	3964,55	4136,31	327,64	4486,8	382,7	3442,3	272,5	5,8
0,78	3963,41	4137,10	327,41	4486,8	382,7	3440,0	272,1	5,8
0,80	3963,41	4137,89	327,86	4486,8	382,7	3440,0	273,0	5,8
0,82	3963,96	4138,68	327,75	4484,5	382,5	3443,5	273,0	5,8
0,83	3962,25	4139,47	327,18	4485,6	381,8	3438,9	272,5	5,8
0,85	3963,40	4140,25	327,86	4485,6	382,7	3441,2	273,0	5,8
0,87	3963,40	4141,03	327,86	4485,6	382,3	3441,2	273,5	5,8

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
0,88	3964,54	4141,80	328,32	4485,6	382,7	3443,5	273,9	5,8
0,90	3967,42	4142,58	328,32	4489,1	382,5	3445,7	274,1	5,8
0,92	3966,27	4143,35	328,21	4487,9	382,0	3444,6	274,4	5,8
0,93	3965,70	4144,11	328,55	4487,9	382,3	3443,5	274,8	5,8
0,95	3965,12	4144,87	328,67	4486,8	382,3	3443,5	275,1	5,8
0,97	3966,26	4145,63	329,01	4486,8	382,3	3445,7	275,7	5,8
0,98	3967,42	4146,39	328,89	4489,1	382,3	3445,7	275,5	5,8
1,00	3966,25	4147,14	329,01	4485,6	382,3	3446,9	275,7	5,8
1,02	3966,85	4147,89	329,35	4489,1	382,7	3444,6	276,0	5,8
1,03	3966,83	4148,64	329,47	4486,8	382,5	3446,9	276,4	5,8
1,05	3967,43	4149,39	329,35	4490,3	382,3	3444,6	276,4	5,8
1,07	3967,41	4150,13	329,47	4487,9	382,3	3446,9	276,7	5,8
1,08	3968,00	4150,86	329,58	4490,3	382,5	3445,7	276,7	5,8
1,10	3966,83	4151,60	329,47	4486,8	381,8	3446,9	277,1	5,8
1,12	3967,42	4152,33	329,70	4489,1	382,5	3445,7	276,9	5,8
1,13	3966,25	4153,06	329,93	4485,6	382,3	3446,9	277,6	5,8
1,15	3967,40	4153,79	330,04	4486,8	382,3	3448,0	277,8	5,8
1,17	3967,42	4154,51	330,27	4489,1	382,5	3445,7	278,0	5,8
1,18	3970,29	4155,23	330,27	4490,3	382,5	3450,3	278,0	5,8
1,20	3967,40	4155,94	330,50	4486,8	382,0	3448,0	279,0	5,8
1,22	3967,42	4156,66	330,73	4489,1	382,5	3445,7	279,0	5,8
1,23	3967,98	4157,37	330,61	4487,9	382,3	3448,0	279,0	5,8
1,25	3966,84	4158,08	330,27	4487,9	381,4	3445,7	279,2	5,8
1,27	3966,82	4158,78	330,50	4485,6	381,8	3448,0	279,2	5,8
1,28	3967,40	4159,48	330,73	4486,8	381,8	3448,0	279,6	5,8
1,30	3969,14	4160,18	330,96	4490,3	382,3	3448,0	279,6	5,8
1,32	3967,40	4160,88	330,61	4486,8	382,0	3448,0	279,2	5,8
1,33	3971,45	4161,57	331,07	4492,6	381,8	3450,3	280,3	5,8
1,35	3968,56	4162,26	330,84	4489,1	381,8	3448,0	279,9	5,8
1,37	3968,55	4162,95	331,18	4486,8	382,0	3450,3	280,3	5,8
1,38	3969,71	4163,64	331,30	4489,1	381,8	3450,3	280,8	5,8
1,40	3969,71	4164,32	331,07	4489,1	381,8	3450,3	280,3	5,8
1,42	3970,28	4165,00	331,64	4489,1	382,3	3451,5	281,0	5,8
1,43	3972,58	4165,67	331,53	4491,4	381,8	3453,7	281,2	5,8
1,45	3970,28	4166,35	331,64	4489,1	382,0	3451,5	281,2	5,8
1,47	3969,13	4167,02	331,18	4487,9	381,4	3450,3	281,0	5,8
1,48	3970,28	4167,68	331,64	4489,1	381,8	3451,5	281,5	5,8
1,50	3972,00	4168,35	331,87	4490,3	382,0	3453,7	281,7	5,8
1,52	3972,59	4169,01	331,76	4492,6	381,8	3452,6	281,7	5,8
1,53	3971,43	4169,67	332,10	4490,3	382,3	3452,6	281,9	5,8
1,55	3972,01	4170,33	331,87	4491,4	381,6	3452,6	282,2	5,8
1,57	3972,00	4170,98	332,21	4490,3	381,8	3453,7	282,6	5,8
1,58	3972,01	4171,63	332,21	4491,4	381,8	3452,6	282,6	5,8
1,60	3971,44	4172,28	332,44	4491,4	381,8	3451,5	283,1	5,8
1,62	3973,15	4172,93	332,44	4491,4	381,6	3454,9	283,3	5,8
1,63	3972,00	4173,57	332,56	4490,3	381,8	3453,7	283,3	5,8
1,65	3972,59	4174,21	332,44	4492,6	381,8	3452,6	283,1	5,8
1,67	3973,15	4174,85	333,02	4491,4	382,3	3454,9	283,8	5,8
1,68	3972,00	4175,49	333,25	4490,3	382,5	3453,7	284,0	5,8
1,70	3974,30	4176,12	332,90	4492,6	381,8	3456,0	284,0	5,8
1,72	3973,73	4176,75	333,13	4492,6	382,0	3454,9	284,2	5,8
1,73	3973,74	4177,38	333,25	4493,7	382,0	3453,7	284,4	5,8
1,75	3974,31	4178,00	333,36	4493,7	382,3	3454,9	284,4	5,8
1,77	3974,31	4178,62	333,36	4493,7	382,0	3454,9	284,7	5,8
1,78	3972,59	4179,24	333,13	4492,6	381,8	3452,6	284,4	5,8

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
1,80	3971,99	4179,86	333,02	4489,1	381,4	3454,9	284,7	5,8
1,82	3974,30	4180,47	333,25	4492,6	381,8	3456,0	284,7	5,8
1,83	3974,30	4181,09	333,47	4492,6	382,0	3456,0	284,9	5,8
1,85	3973,15	4181,70	333,47	4491,4	382,0	3454,9	284,9	5,8
1,87	3973,74	4182,30	333,59	4493,7	381,8	3453,7	285,4	5,8
1,88	3973,15	4182,91	333,13	4491,4	381,8	3454,9	284,4	5,8
1,90	3973,72	4183,51	333,47	4491,4	381,6	3456,0	285,4	5,8
1,92	3976,03	4184,11	333,24	4493,7	381,6	3458,3	284,9	5,8
1,93	3975,45	4184,70	333,47	4492,6	381,6	3458,3	285,4	5,8
1,95	3974,87	4185,30	333,47	4492,6	381,4	3457,2	285,6	5,8
1,97	3974,87	4185,89	333,93	4492,6	382,0	3457,2	285,8	5,8
1,98	3973,73	4186,48	333,70	4492,6	381,6	3454,9	285,8	5,8
2,00	3976,03	4187,07	333,93	4493,7	381,8	3458,3	286,1	5,8
2,02	3976,03	4187,65	333,59	4494,9	381,4	3457,2	285,8	5,8
2,03	3975,45	4188,23	334,16	4492,6	381,6	3458,3	286,7	5,8
2,05	3976,03	4188,81	334,16	4493,7	381,6	3458,3	286,7	5,8
2,07	3976,60	4189,39	334,16	4493,7	381,8	3459,5	286,5	5,8
2,08	3974,87	4189,97	333,93	4492,6	381,4	3457,2	286,5	5,8
2,10	3975,45	4190,54	333,82	4492,6	381,4	3458,3	286,3	5,8
2,12	3974,31	4191,11	334,05	4493,7	381,4	3454,9	286,7	5,7
2,13	3976,60	4191,68	334,16	4493,7	381,4	3459,5	287,0	5,8
2,15	3976,61	4192,24	333,93	4494,9	381,1	3458,3	286,7	5,7
2,17	3976,02	4192,81	334,28	4492,6	381,4	3459,5	287,2	5,7
2,18	3975,45	4193,37	334,28	4492,6	381,4	3458,3	287,2	5,7
2,20	3974,87	4193,92	334,50	4492,6	381,6	3457,2	287,4	5,7
2,22	3976,03	4194,48	334,27	4494,9	381,1	3457,2	287,4	5,7
2,23	3977,18	4195,04	334,50	4494,9	381,4	3459,5	287,7	5,7
2,25	3976,60	4195,59	334,62	4493,7	381,4	3459,5	287,9	5,7
2,27	3974,87	4196,14	334,50	4491,4	381,4	3458,3	287,7	5,7
2,28	3974,29	4196,68	334,73	4490,3	381,6	3458,3	287,9	5,7
2,30	3975,45	4197,23	334,16	4492,6	380,7	3458,3	287,7	5,7
2,32	3973,72	4197,77	334,27	4491,4	380,9	3456,0	287,7	5,7
2,33	3975,45	4198,31	334,50	4492,6	381,1	3458,3	287,9	5,7
2,35	3977,17	4198,85	334,27	4493,7	380,4	3460,6	288,1	5,7
2,37	3976,60	4199,38	334,50	4493,7	380,9	3459,5	288,1	5,7
2,38	3975,44	4199,92	334,62	4491,4	380,9	3459,5	288,3	5,7
2,40	3976,60	4200,45	334,62	4493,7	381,1	3459,5	288,1	5,7
2,42	3975,45	4200,98	334,62	4492,6	380,9	3458,3	288,3	5,7
2,43	3974,86	4201,50	334,50	4490,3	380,4	3459,5	288,6	5,7
2,45	3976,03	4202,03	334,73	4493,7	380,4	3458,3	289,0	5,7
2,47	3976,60	4202,55	334,73	4493,7	380,7	3459,5	288,8	5,7
2,48	3977,75	4203,07	334,96	4494,9	380,9	3460,6	289,0	5,7
2,50	3977,16	4203,59	334,73	4492,6	380,4	3461,7	289,0	5,7
2,52	3976,60	4204,11	334,96	4493,7	380,4	3459,5	289,5	5,7
2,53	3976,01	4204,62	334,85	4491,4	380,7	3460,6	289,0	5,7
2,55	3977,16	4205,13	334,73	4492,6	380,4	3461,7	289,0	5,7
2,57	3977,17	4205,64	334,85	4493,7	380,4	3460,6	289,3	5,7
2,58	3977,17	4206,15	335,31	4493,7	380,9	3460,6	289,7	5,7
2,60	3976,59	4206,66	334,73	4492,6	380,2	3460,6	289,3	5,7
2,62	3976,01	4207,16	334,85	4491,4	380,2	3460,6	289,5	5,7
2,63	3977,16	4207,66	335,08	4492,6	380,4	3461,7	289,7	5,7
2,65	3976,59	4208,16	334,85	4492,6	379,7	3460,6	289,9	5,7
2,67	3977,15	4208,66	335,30	4491,4	380,7	3462,9	289,9	5,7
2,68	3977,73	4209,15	334,96	4492,6	380,4	3462,9	289,5	5,7
2,70	3977,17	4209,64	335,19	4493,7	380,4	3460,6	289,9	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
2,72	3976,59	4210,14	335,19	4492,6	380,4	3460,6	289,9	5,7
2,73	3977,74	4210,62	334,96	4493,7	380,0	3461,7	289,9	5,7
2,75	3976,02	4211,11	335,30	4492,6	380,2	3459,5	290,4	5,7
2,77	3977,74	4211,60	335,30	4493,7	380,2	3461,7	290,4	5,7
2,78	3977,16	4212,08	335,53	4492,6	380,4	3461,7	290,6	5,7
2,80	3978,31	4212,56	335,76	4493,7	380,7	3462,9	290,9	5,7
2,82	3978,31	4213,04	335,53	4493,7	380,2	3462,9	290,9	5,7
2,83	3978,31	4213,52	335,53	4493,7	380,2	3462,9	290,9	5,7
2,85	3977,74	4213,99	335,30	4493,7	380,0	3461,7	290,6	5,7
2,87	3979,46	4214,46	335,65	4494,9	380,0	3464,0	291,3	5,7
2,88	3977,16	4214,93	335,42	4492,6	380,0	3461,7	290,9	5,7
2,90	3978,30	4215,40	335,76	4492,6	380,2	3464,0	291,3	5,7
2,92	3978,87	4215,87	335,42	4492,6	380,0	3465,2	290,9	5,7
2,93	3978,88	4216,34	335,76	4493,7	380,0	3464,0	291,5	5,7
2,95	3979,46	4216,80	335,76	4494,9	380,0	3464,0	291,5	5,7
2,97	3980,03	4217,26	335,65	4494,9	380,0	3465,2	291,3	5,7
2,98	3978,88	4217,72	335,76	4493,7	380,0	3464,0	291,5	5,7
3,00	3979,45	4218,18	335,99	4493,7	380,2	3465,2	291,8	5,7
3,02	3980,03	4218,63	335,65	4494,9	379,5	3465,2	291,8	5,7
3,03	3979,46	4219,09	335,76	4494,9	379,7	3464,0	291,8	5,7
3,05	3980,03	4219,54	335,76	4494,9	379,7	3465,2	291,8	5,7
3,07	3978,88	4219,99	335,88	4493,7	380,0	3464,0	291,8	5,7
3,08	3980,60	4220,44	335,76	4494,9	379,5	3466,3	292,0	5,7
3,10	3980,60	4220,88	335,88	4494,9	379,7	3466,3	292,0	5,7
3,12	3978,88	4221,33	335,99	4493,7	380,0	3464,0	292,0	5,7
3,13	3979,44	4221,77	336,33	4492,6	380,2	3466,3	292,5	5,7
3,15	3980,02	4222,21	335,88	4492,6	379,5	3467,5	292,2	5,7
3,17	3978,87	4222,65	336,10	4492,6	379,5	3465,2	292,7	5,7
3,18	3979,45	4223,09	335,42	4493,7	379,1	3465,2	291,8	5,7
3,20	3980,60	4223,52	335,65	4494,9	379,1	3466,3	292,2	5,7
3,22	3978,30	4223,96	335,88	4492,6	379,5	3464,0	292,2	5,7
3,23	3979,45	4224,39	336,10	4493,7	379,5	3465,2	292,7	5,7
3,25	3978,31	4224,82	335,87	4493,7	379,1	3462,9	292,7	5,7
3,27	3978,30	4225,25	335,87	4492,6	379,1	3464,0	292,7	5,7
3,28	3978,30	4225,67	335,87	4492,6	379,1	3464,0	292,7	5,7
3,30	3978,88	4226,10	335,87	4493,7	379,1	3464,0	292,7	5,7
3,32	3979,44	4226,52	335,76	4492,6	378,8	3466,3	292,7	5,7
3,33	3979,45	4226,94	335,99	4493,7	378,8	3465,2	293,2	5,7
3,35	3977,70	4227,36	335,99	4489,1	378,6	3466,3	293,4	5,7
3,37	3978,28	4227,78	335,53	4490,3	378,4	3466,3	292,7	5,7
3,38	3977,71	4228,19	335,64	4490,3	378,4	3465,2	292,9	5,7
3,40	3976,56	4228,61	335,87	4489,1	378,4	3464,0	293,4	5,7
3,42	3978,28	4229,02	335,87	4490,3	378,6	3466,3	293,2	5,7
3,43	3975,42	4229,43	336,10	4489,1	378,4	3461,7	293,8	5,7
3,45	3977,14	4229,84	335,99	4490,3	378,4	3464,0	293,6	5,7
3,47	3975,98	4230,25	335,64	4487,9	377,7	3464,0	293,6	5,7
3,48	3974,81	4230,65	335,41	4484,5	377,2	3465,2	293,6	5,7
3,50	3976,54	4231,06	335,30	4486,8	377,2	3466,3	293,4	5,7
3,52	3977,12	4231,46	335,76	4486,8	377,7	3467,5	293,8	5,7
3,53	3976,54	4231,86	335,41	4486,8	377,2	3466,3	293,6	5,7
3,55	3976,54	4232,26	335,53	4486,8	377,2	3466,3	293,8	5,7
3,57	3975,38	4232,66	335,41	4484,5	377,0	3466,3	293,8	5,7
3,58	3973,66	4233,05	335,18	4483,3	376,5	3464,0	293,8	5,7
3,60	3974,23	4233,44	335,18	4483,3	376,3	3465,2	294,1	5,7
3,62	3974,80	4233,84	334,84	4483,3	375,8	3466,3	293,8	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
3,63	3975,38	4234,23	335,30	4484,5	376,3	3466,3	294,3	5,7
3,65	3974,23	4234,62	335,07	4483,3	376,1	3465,2	294,1	5,7
3,67	3974,79	4235,00	335,18	4482,1	375,8	3467,5	294,5	5,7
3,68	3974,21	4235,39	335,07	4481,0	375,8	3467,5	294,3	5,7
3,70	3973,06	4235,78	334,95	4479,8	375,8	3466,3	294,1	5,7
3,72	3973,07	4236,16	334,95	4481,0	375,4	3465,2	294,5	5,7
3,73	3974,21	4236,54	335,18	4481,0	375,8	3467,5	294,5	5,7
3,75	3974,22	4236,92	334,95	4482,1	375,4	3466,3	294,5	5,7
3,77	3972,49	4237,30	335,07	4479,8	375,6	3465,2	294,5	5,7
3,78	3973,05	4237,67	334,95	4478,7	375,4	3467,5	294,5	5,7
3,80	3973,63	4238,05	334,95	4479,8	375,2	3467,5	294,8	5,7
3,82	3971,90	4238,42	334,61	4477,5	375,2	3466,3	294,1	5,7
3,83	3971,90	4238,79	334,72	4477,5	374,7	3466,3	294,8	5,7
3,85	3971,90	4239,16	334,84	4477,5	374,9	3466,3	294,8	5,7
3,87	3971,33	4239,53	335,07	4477,5	375,2	3465,2	295,0	5,7
3,88	3971,90	4239,90	334,72	4477,5	374,5	3466,3	295,0	5,7
3,90	3971,33	4240,26	334,95	4477,5	374,9	3465,2	295,0	5,7
3,92	3971,90	4240,63	335,07	4477,5	374,7	3466,3	295,4	5,7
3,93	3970,18	4240,99	334,61	4476,3	374,2	3464,0	295,0	5,7
3,95	3972,48	4241,35	334,61	4478,7	374,0	3466,3	295,2	5,7
3,97	3973,63	4241,71	334,61	4478,7	374,2	3468,6	295,0	5,7
3,98	3972,48	4242,07	334,95	4478,7	374,7	3466,3	295,2	5,7
4,00	3971,31	4242,43	335,07	4475,2	374,2	3467,5	295,9	5,7
4,02	3971,90	4242,78	335,18	4477,5	374,5	3466,3	295,9	5,7
4,03	3972,46	4243,14	335,18	4475,2	374,5	3469,7	295,9	5,7
4,05	3973,05	4243,49	335,18	4477,5	374,5	3468,6	295,9	5,7
4,07	3971,88	4243,84	335,07	4475,2	374,2	3468,6	295,9	5,7
4,08	3973,61	4244,19	335,07	4476,3	374,0	3470,9	296,1	5,7
4,10	3971,88	4244,54	335,07	4475,2	374,2	3468,6	295,9	5,7
4,12	3971,88	4244,88	334,61	4475,2	373,8	3468,6	295,4	5,7
4,13	3972,46	4245,23	334,72	4475,2	373,3	3469,7	296,1	5,7
4,15	3971,88	4245,57	334,49	4475,2	373,1	3468,6	295,9	5,7
4,17	3972,46	4245,91	335,07	4476,3	373,8	3468,6	296,4	5,7
4,18	3971,88	4246,25	334,95	4475,2	373,5	3468,6	296,4	5,7
4,20	3971,88	4246,59	334,61	4475,2	373,1	3468,6	296,1	5,7
4,22	3969,57	4246,93	334,49	4471,7	372,9	3467,5	296,1	5,7
4,23	3970,72	4247,27	334,26	4472,9	372,6	3468,6	295,9	5,7
4,25	3971,31	4247,60	334,61	4475,2	372,9	3467,5	296,4	5,7
4,27	3971,30	4247,94	334,15	4474,0	372,2	3468,6	296,1	5,7
4,28	3969,56	4248,27	334,15	4470,5	372,4	3468,6	295,9	5,7
4,30	3970,15	4248,60	334,38	4472,9	372,6	3467,5	296,1	5,7
4,32	3971,88	4248,93	334,49	4474,0	372,6	3469,7	296,4	5,7
4,33	3969,56	4249,26	334,61	4470,5	372,6	3468,6	296,6	5,7
4,35	3970,72	4249,59	334,60	4472,9	372,2	3468,6	297,0	5,7
4,37	3970,15	4249,91	334,60	4472,9	372,4	3467,5	296,8	5,7
4,38	3971,88	4250,24	335,06	4474,0	372,9	3469,7	297,3	5,7
4,40	3972,45	4250,56	334,60	4474,0	372,4	3470,9	296,8	5,7
4,42	3970,14	4250,88	335,18	4470,5	372,6	3469,7	297,7	5,7
4,43	3973,03	4251,20	334,60	4475,2	372,2	3470,9	297,0	5,7
4,45	3972,45	4251,52	334,95	4474,0	372,2	3470,9	297,7	5,7
4,47	3974,17	4251,84	334,83	4475,2	372,2	3473,2	297,5	5,7
4,48	3971,87	4252,15	335,29	4472,9	372,6	3470,9	298,0	5,7
4,50	3971,30	4252,47	334,83	4474,0	372,2	3468,6	297,5	5,7
4,52	3972,43	4252,78	334,60	4471,7	371,9	3473,2	297,3	5,7
4,53	3971,29	4253,09	334,60	4471,7	371,9	3470,9	297,3	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
4,55	3972,42	4253,40	334,83	4470,5	371,9	3474,3	297,7	5,7
4,57	3973,60	4253,71	334,95	4475,2	372,2	3472,0	297,7	5,7
4,58	3971,28	4254,02	334,83	4470,5	371,5	3472,0	298,2	5,7
4,60	3970,14	4254,33	334,72	4470,5	371,9	3469,7	297,5	5,7
4,62	3970,71	4254,64	335,06	4470,5	372,2	3470,9	298,0	5,7
4,63	3970,14	4254,94	334,72	4470,5	371,7	3469,7	297,7	5,7
4,65	3971,29	4255,24	334,72	4471,7	371,7	3470,9	297,7	5,7
4,67	3972,43	4255,55	334,72	4471,7	371,2	3473,2	298,2	5,7
4,68	3970,71	4255,85	334,95	4470,5	371,5	3470,9	298,4	5,7
4,70	3973,01	4256,15	335,18	4472,9	371,7	3473,2	298,6	5,7
4,72	3971,86	4256,45	335,18	4471,7	371,9	3472,0	298,4	5,7
4,73	3974,16	4256,74	335,41	4474,0	372,2	3474,3	298,6	5,7
4,75	3973,59	4257,04	335,18	4474,0	371,7	3473,2	298,6	5,7
4,77	3973,02	4257,33	335,29	4474,0	371,9	3472,0	298,6	5,7
4,78	3974,74	4257,63	335,06	4475,2	371,7	3474,3	298,4	5,7
4,80	3971,86	4257,92	334,95	4471,7	371,5	3472,0	298,4	5,7
4,82	3971,86	4258,21	335,18	4471,7	371,7	3472,0	298,6	5,7
4,83	3972,44	4258,50	335,41	4472,9	371,7	3472,0	299,1	5,7
4,85	3973,02	4258,79	334,95	4474,0	371,2	3472,0	298,6	5,7
4,87	3971,85	4259,08	335,41	4470,5	371,5	3473,2	299,3	5,7
4,88	3973,59	4259,36	334,72	4474,0	371,0	3473,2	298,4	5,7
4,90	3971,86	4259,65	334,95	4471,7	371,0	3472,0	298,9	5,7
4,92	3971,85	4259,93	334,95	4470,5	371,2	3473,2	298,6	5,7
4,93	3973,01	4260,21	334,83	4472,9	371,0	3473,2	298,6	5,7
4,95	3973,02	4260,50	335,18	4474,0	371,5	3472,0	298,9	5,7
4,97	3970,13	4260,78	334,83	4469,4	370,6	3470,9	299,1	5,7
4,98	3970,13	4261,06	334,72	4469,4	370,8	3470,9	298,6	5,7
5,00	3971,26	4261,33	335,18	4468,2	371,2	3474,3	299,1	5,7
5,02	3973,01	4261,61	335,18	4472,9	371,2	3473,2	299,1	5,7
5,03	3971,86	4261,89	335,06	4471,7	371,0	3472,0	299,1	5,7
5,05	3972,43	4262,16	335,29	4471,7	371,2	3473,2	299,3	5,7
5,07	3971,28	4262,44	335,29	4470,5	371,0	3472,0	299,6	5,7
5,08	3974,15	4262,71	335,29	4472,9	371,5	3475,5	299,1	5,7
5,10	3973,59	4262,98	335,40	4474,0	371,2	3473,2	299,6	5,7
5,12	3975,87	4263,25	335,29	4474,0	371,0	3477,7	299,6	5,7
5,13	3972,42	4263,52	335,40	4470,5	371,2	3474,3	299,6	5,7
5,15	3974,14	4263,79	335,29	4471,7	371,2	3476,6	299,3	5,7
5,17	3974,16	4264,05	335,40	4474,0	371,0	3474,3	299,8	5,7
5,18	3972,42	4264,32	334,95	4470,5	370,6	3474,3	299,3	5,7
5,20	3971,28	4264,58	334,60	4470,5	370,6	3472,0	298,6	5,7
5,22	3971,86	4264,85	334,95	4471,7	370,8	3472,0	299,1	5,7
5,23	3973,01	4265,11	334,60	4472,9	370,1	3473,2	299,1	5,7
5,25	3973,01	4265,37	335,06	4472,9	370,6	3473,2	299,6	5,7
5,27	3972,99	4265,63	335,29	4470,5	370,8	3475,5	299,8	5,7
5,28	3973,59	4265,89	335,06	4474,0	370,6	3473,2	299,6	5,7
5,30	3973,01	4266,15	335,06	4472,9	370,6	3473,2	299,6	5,7
5,32	3974,73	4266,41	335,06	4474,0	370,3	3475,5	299,8	5,7
5,33	3974,74	4266,66	335,17	4475,2	370,6	3474,3	299,8	5,7
5,35	3977,03	4266,92	335,40	4476,3	371,0	3477,7	299,8	5,7
5,37	3976,45	4267,17	335,52	4475,2	371,0	3477,7	300,0	5,7
5,38	3975,30	4267,42	335,29	4474,0	370,8	3476,6	299,8	5,7
5,40	3974,73	4267,68	335,29	4474,0	370,8	3475,5	299,8	5,7
5,42	3974,71	4267,93	335,40	4471,7	370,6	3477,7	300,3	5,7
5,43	3974,15	4268,18	335,40	4472,9	370,8	3475,5	300,0	5,7
5,45	3975,29	4268,43	335,52	4471,7	370,8	3478,9	300,3	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
5,47	3975,87	4268,67	335,52	4472,9	370,6	3478,9	300,5	5,7
5,48	3973,56	4268,92	335,06	4470,5	370,1	3476,6	300,0	5,7
5,50	3975,87	4269,17	335,29	4474,0	370,3	3477,7	300,3	5,7
5,52	3975,31	4269,41	335,06	4475,2	370,3	3475,5	299,8	5,7
5,53	3973,01	4269,65	334,83	4472,9	369,9	3473,2	299,8	5,7
5,55	3973,00	4269,90	335,17	4471,7	370,3	3474,3	300,0	5,7
5,57	3973,57	4270,14	335,06	4471,7	370,1	3475,5	300,0	5,7
5,58	3974,15	4270,38	335,29	4472,9	370,3	3475,5	300,3	5,7
5,60	3971,27	4270,62	335,52	4469,4	370,3	3473,2	300,7	5,7
5,62	3975,88	4270,86	335,75	4475,2	370,6	3476,6	300,9	5,7
5,63	3972,42	4271,09	335,86	4470,5	370,8	3474,3	300,9	5,7
5,65	3974,73	4271,33	335,17	4474,0	370,1	3475,5	300,3	5,7
5,67	3972,99	4271,57	335,52	4470,5	370,6	3475,5	300,5	5,7
5,68	3972,99	4271,80	335,63	4470,5	370,3	3475,5	300,9	5,7
5,70	3974,15	4272,04	335,06	4472,9	370,1	3475,5	300,0	5,7
5,72	3975,88	4272,27	335,52	4475,2	370,3	3476,6	300,7	5,7
5,73	3977,03	4272,50	336,09	4475,2	371,0	3478,9	301,2	5,7
5,75	3975,88	4272,73	335,63	4475,2	370,3	3476,6	300,9	5,7
5,77	3977,61	4272,96	335,63	4476,3	370,1	3478,9	301,2	5,7
5,78	3976,45	4273,19	335,40	4474,0	370,1	3478,9	300,7	5,7
5,80	3975,87	4273,42	335,75	4474,0	370,6	3477,7	300,9	5,7
5,82	3974,14	4273,65	335,29	4471,7	369,6	3476,6	300,9	5,7
5,83	3972,42	4273,87	335,29	4470,5	369,6	3474,3	300,9	5,7
5,85	3974,14	4274,10	335,63	4471,7	370,3	3476,6	300,9	5,7
5,87	3974,72	4274,32	335,86	4472,9	370,3	3476,6	301,4	5,7
5,88	3975,87	4274,54	335,63	4472,9	370,3	3478,9	300,9	5,7
5,90	3973,56	4274,77	335,63	4470,5	370,3	3476,6	300,9	5,7
5,92	3976,45	4274,99	335,98	4475,2	370,6	3477,7	301,4	5,7
5,93	3976,45	4275,21	336,09	4475,2	370,8	3477,7	301,4	5,7
5,95	3976,45	4275,43	335,98	4474,0	370,6	3478,9	301,4	5,7
5,97	3975,88	4275,65	335,75	4475,2	369,9	3476,6	301,6	5,7
5,98	3975,87	4275,87	335,52	4472,9	370,1	3478,9	300,9	5,7
6,00	3975,29	4276,08	335,75	4472,9	370,1	3477,7	301,4	5,7
6,02	3974,15	4276,30	335,52	4472,9	369,9	3475,5	301,2	5,7
6,03	3974,14	4276,51	335,63	4471,7	370,1	3476,6	301,2	5,7
6,05	3975,87	4276,73	335,86	4474,0	369,9	3477,7	301,9	5,7
6,07	3972,99	4276,94	335,98	4470,5	370,1	3475,5	301,9	5,7
6,08	3976,45	4277,15	335,63	4474,0	369,9	3478,9	301,4	5,7
6,10	3976,45	4277,37	336,21	4475,2	370,8	3477,7	301,6	5,7
6,12	3978,18	4277,58	336,09	4476,3	370,3	3480,0	301,9	5,7
6,13	3977,03	4277,79	335,86	4475,2	370,3	3478,9	301,4	5,7
6,15	3977,60	4278,00	336,09	4475,2	370,3	3480,0	301,9	5,7
6,17	3976,45	4278,20	335,98	4475,2	370,1	3477,7	301,9	5,7
6,18	3976,45	4278,41	335,98	4475,2	370,1	3477,7	301,9	5,7
6,20	3974,71	4278,62	335,75	4471,7	369,6	3477,7	301,9	5,7
6,22	3975,30	4278,82	335,63	4474,0	369,9	3476,6	301,4	5,7
6,23	3975,88	4279,03	335,86	4475,2	369,9	3476,6	301,9	5,7
6,25	3977,62	4279,23	336,09	4477,5	370,3	3477,7	301,9	5,7
6,27	3976,45	4279,44	335,86	4475,2	369,9	3477,7	301,9	5,7
6,28	3976,45	4279,64	335,98	4475,2	370,1	3477,7	301,9	5,7
6,30	3977,03	4279,84	336,32	4476,3	370,3	3477,7	302,3	5,7
6,32	3977,02	4280,04	336,32	4474,0	370,3	3480,0	302,3	5,7
6,33	3978,76	4280,24	336,32	4477,5	370,3	3480,0	302,3	5,7
6,35	3976,45	4280,44	336,32	4475,2	370,3	3477,7	302,3	5,7
6,37	3977,03	4280,64	335,98	4476,3	369,9	3477,7	302,1	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
6,38	3975,87	4280,83	336,09	4474,0	369,9	3477,7	302,3	5,7
6,40	3976,45	4281,03	336,09	4474,0	369,9	3478,9	302,3	5,7
6,42	3977,03	4281,23	335,98	4475,2	370,1	3478,9	301,9	5,7
6,43	3976,46	4281,42	336,09	4476,3	369,9	3476,6	302,3	5,7
6,45	3976,45	4281,62	335,97	4475,2	369,6	3477,7	302,3	5,7
6,47	3978,76	4281,81	335,98	4477,5	369,9	3480,0	302,1	5,7
6,48	3977,03	4282,00	335,86	4475,2	369,4	3478,9	302,3	5,7
6,50	3978,76	4282,19	336,20	4477,5	369,6	3480,0	302,8	5,7
6,52	3978,76	4282,38	336,43	4477,5	370,1	3480,0	302,8	5,7
6,53	3979,33	4282,58	337,01	4477,5	370,8	3481,2	303,2	5,7
6,55	3978,19	4282,76	336,55	4477,5	370,1	3478,9	303,0	5,7
6,57	3978,18	4282,95	336,66	4476,3	370,3	3480,0	303,0	5,7
6,58	3978,76	4283,14	336,66	4477,5	370,1	3480,0	303,2	5,7
6,60	3979,32	4283,33	336,20	4476,3	369,4	3482,3	303,0	5,7
6,62	3976,45	4283,51	336,09	4475,2	369,9	3477,7	302,3	5,7
6,63	3979,33	4283,70	336,55	4477,5	370,1	3481,2	303,0	5,7
6,65	3978,18	4283,88	336,32	4476,3	369,4	3480,0	303,2	5,7
6,67	3977,03	4284,07	335,97	4475,2	369,6	3478,9	302,3	5,7
6,68	3978,75	4284,25	336,32	4476,3	369,6	3481,2	303,0	5,7
6,70	3977,61	4284,43	336,09	4476,3	369,4	3478,9	302,8	5,7
6,72	3978,19	4284,62	336,32	4477,5	369,9	3478,9	302,8	5,7
6,73	3979,90	4284,80	336,55	4477,5	370,1	3482,3	303,0	5,7
6,75	3978,75	4284,98	336,66	4476,3	370,1	3481,2	303,2	5,7
6,77	3979,33	4285,16	336,89	4477,5	370,1	3481,2	303,7	5,7
6,78	3980,48	4285,34	336,78	4478,7	370,1	3482,3	303,5	5,7
6,80	3978,76	4285,51	336,66	4477,5	369,9	3480,0	303,5	5,7
6,82	3978,17	4285,69	336,55	4475,2	369,9	3481,2	303,2	5,7
6,83	3978,18	4285,87	336,20	4476,3	369,4	3480,0	303,0	5,7
6,85	3978,18	4286,04	336,43	4476,3	369,9	3480,0	303,0	5,7
6,87	3977,03	4286,22	336,43	4475,2	369,6	3478,9	303,2	5,7
6,88	3976,46	4286,39	336,09	4476,3	369,4	3476,6	302,8	5,7
6,90	3978,18	4286,57	336,09	4476,3	369,4	3480,0	302,8	5,7
6,92	3978,76	4286,74	336,20	4477,5	369,6	3480,0	302,8	5,7
6,93	3979,34	4286,91	336,43	4478,7	369,4	3480,0	303,5	5,7
6,95	3978,75	4287,08	336,32	4476,3	369,9	3481,2	302,8	5,7
6,97	3981,64	4287,25	336,66	4481,0	370,1	3482,3	303,2	5,7
6,98	3981,06	4287,42	336,78	4479,8	370,3	3482,3	303,2	5,7
7,00	3981,63	4287,59	336,89	4479,8	370,1	3483,5	303,7	5,7
7,02	3979,33	4287,76	336,89	4477,5	370,3	3481,2	303,5	5,7
7,03	3979,90	4287,93	336,89	4477,5	370,1	3482,3	303,7	5,7
7,05	3980,48	4288,10	336,55	4478,7	369,9	3482,3	303,2	5,7
7,07	3978,18	4288,26	336,89	4476,3	370,3	3480,0	303,5	5,7
7,08	3979,90	4288,43	336,32	4477,5	369,4	3482,3	303,2	5,7
7,10	3979,34	4288,60	336,43	4478,7	369,6	3480,0	303,2	5,7
7,12	3979,91	4288,76	336,78	4478,7	370,3	3481,2	303,2	5,7
7,13	3980,48	4288,92	336,78	4478,7	369,6	3482,3	303,9	5,7
7,15	3981,06	4289,09	336,89	4479,8	370,1	3482,3	303,7	5,7
7,17	3979,91	4289,25	337,01	4478,7	370,3	3481,2	303,7	5,7
7,18	3980,47	4289,41	336,66	4477,5	369,9	3483,5	303,5	5,7
7,20	3981,62	4289,57	336,78	4478,7	369,9	3484,6	303,7	5,7
7,22	3980,47	4289,73	336,78	4477,5	369,9	3483,5	303,7	5,7
7,23	3980,48	4289,89	336,43	4478,7	369,6	3482,3	303,2	5,7
7,25	3978,76	4290,05	336,66	4477,5	369,9	3480,0	303,5	5,7
7,27	3979,90	4290,21	336,32	4477,5	369,4	3482,3	303,2	5,7
7,28	3979,32	4290,37	336,32	4476,3	369,4	3482,3	303,2	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
7,30	3979,34	4290,53	336,43	4478,7	369,2	3480,0	303,7	5,7
7,32	3977,60	4290,68	336,20	4475,2	369,2	3480,0	303,2	5,7
7,33	3979,32	4290,84	336,66	4476,3	369,6	3482,3	303,7	5,7
7,35	3979,90	4291,00	336,55	4477,5	369,4	3482,3	303,7	5,7
7,37	3981,62	4291,15	336,55	4478,7	369,4	3484,6	303,7	5,7
7,38	3980,47	4291,30	336,66	4477,5	369,9	3483,5	303,5	5,7
7,40	3981,06	4291,46	336,66	4479,8	369,6	3482,3	303,7	5,7
7,42	3981,06	4291,61	337,01	4479,8	370,3	3482,3	303,7	5,7
7,43	3981,62	4291,76	336,89	4478,7	370,1	3484,6	303,7	5,7
7,45	3981,04	4291,91	336,66	4477,5	369,4	3484,6	303,9	5,7
7,47	3981,05	4292,07	336,66	4478,7	369,6	3483,5	303,7	5,7
7,48	3979,89	4292,22	336,20	4476,3	369,2	3483,5	303,2	5,7
7,50	3979,90	4292,37	336,20	4477,5	369,2	3482,3	303,2	5,7
7,52	3981,06	4292,51	336,66	4479,8	369,4	3482,3	303,9	5,7
7,53	3980,47	4292,66	336,66	4477,5	369,6	3483,5	303,7	5,7
7,55	3981,05	4292,81	336,66	4478,7	369,4	3483,5	303,9	5,7
7,57	3981,06	4292,96	337,12	4479,8	370,1	3482,3	304,1	5,7
7,58	3981,63	4293,11	337,12	4479,8	370,1	3483,5	304,1	5,7
7,60	3982,77	4293,25	336,66	4479,8	369,4	3485,7	303,9	5,7
7,62	3982,19	4293,40	337,12	4478,7	370,1	3485,7	304,1	5,7
7,63	3982,20	4293,54	336,89	4479,8	369,4	3484,6	304,4	5,7
7,65	3981,63	4293,69	336,78	4479,8	369,9	3483,5	303,7	5,7
7,67	3981,06	4293,83	336,66	4479,8	369,4	3482,3	303,9	5,7
7,68	3981,61	4293,97	336,55	4477,5	369,2	3485,7	303,9	5,7
7,70	3979,32	4294,12	336,55	4476,3	368,5	3482,3	304,6	5,7
7,72	3981,63	4294,26	336,78	4479,8	369,4	3483,5	304,1	5,7
7,73	3980,47	4294,40	336,66	4477,5	369,4	3483,5	303,9	5,7
7,75	3982,20	4294,54	336,89	4479,8	369,2	3484,6	304,6	5,7
7,77	3982,77	4294,68	337,01	4479,8	370,1	3485,7	303,9	5,7
7,78	3982,20	4294,82	337,46	4479,8	370,3	3484,6	304,6	5,7
7,80	3982,78	4294,96	337,35	4481,0	369,9	3484,6	304,8	5,7
7,82	3981,04	4295,10	336,89	4477,5	369,6	3484,6	304,1	5,7
7,83	3982,77	4295,24	336,78	4479,8	369,4	3485,7	304,1	5,7
7,85	3981,62	4295,37	336,32	4478,7	368,7	3484,6	303,9	5,7
7,87	3979,90	4295,51	336,55	4477,5	369,2	3482,3	303,9	5,7
7,88	3979,89	4295,65	336,55	4476,3	368,9	3483,5	304,1	5,7
7,90	3982,19	4295,78	336,89	4478,7	369,4	3485,7	304,4	5,7
7,92	3982,77	4295,92	337,01	4479,8	369,4	3485,7	304,6	5,7
7,93	3982,78	4296,05	337,01	4481,0	369,6	3484,6	304,4	5,7
7,95	3982,77	4296,19	337,35	4479,8	369,9	3485,7	304,8	5,7
7,97	3981,62	4296,32	336,89	4478,7	369,6	3484,6	304,1	5,7
7,98	3982,20	4296,45	337,00	4479,8	369,2	3484,6	304,8	5,7
8,00	3981,62	4296,58	337,12	4478,7	369,6	3484,6	304,6	5,7
8,02	3981,05	4296,72	336,89	4478,7	369,2	3483,5	304,6	5,7
8,03	3982,77	4296,85	336,66	4479,8	368,9	3485,7	304,4	5,7
8,05	3981,04	4296,98	337,12	4477,5	369,6	3484,6	304,6	5,7
8,07	3981,62	4297,11	336,89	4478,7	369,2	3484,6	304,6	5,7
8,08	3983,35	4297,24	337,01	4481,0	369,4	3485,7	304,6	5,7
8,10	3982,20	4297,37	337,23	4479,8	369,4	3484,6	305,1	5,7
8,12	3985,09	4297,50	337,58	4483,3	369,6	3486,9	305,5	5,7
8,13	3984,51	4297,62	337,35	4482,1	369,4	3486,9	305,3	5,7
8,15	3983,93	4297,75	337,23	4481,0	369,4	3486,9	305,1	5,7
8,17	3983,35	4297,88	337,23	4481,0	369,4	3485,7	305,1	5,7
8,18	3983,92	4298,00	337,46	4479,8	369,6	3488,0	305,3	5,7
8,20	3981,04	4298,13	336,89	4477,5	368,7	3484,6	305,1	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
8,22	3981,06	4298,26	337,01	4479,8	369,4	3482,3	304,6	5,7
8,23	3981,62	4298,38	336,89	4478,7	369,2	3484,6	304,6	5,7
8,25	3983,35	4298,51	337,12	4481,0	369,6	3485,7	304,6	5,7
8,27	3982,20	4298,63	337,01	4479,8	369,4	3484,6	304,6	5,7
8,28	3982,77	4298,75	337,23	4479,8	369,4	3485,7	305,1	5,7
8,30	3982,20	4298,88	337,00	4479,8	368,9	3484,6	305,1	5,7
8,32	3982,20	4299,00	337,12	4479,8	369,6	3484,6	304,6	5,7
8,33	3985,08	4299,12	337,23	4482,1	369,6	3488,0	304,8	5,7
8,35	3983,35	4299,24	337,23	4479,8	369,4	3486,9	305,1	5,7
8,37	3982,77	4299,36	337,00	4479,8	369,2	3485,7	304,8	5,7
8,38	3982,77	4299,48	336,89	4479,8	369,2	3485,7	304,6	5,7
8,40	3983,93	4299,60	337,00	4482,1	368,9	3485,7	305,1	5,7
8,42	3982,20	4299,72	337,00	4479,8	369,2	3484,6	304,8	5,7
8,43	3982,78	4299,84	336,89	4481,0	368,9	3484,6	304,8	5,7
8,45	3982,77	4299,96	336,66	4479,8	368,7	3485,7	304,6	5,7
8,47	3982,20	4300,08	337,35	4479,8	369,4	3484,6	305,3	5,7
8,48	3982,78	4300,20	337,46	4481,0	369,4	3484,6	305,5	5,7
8,50	3983,35	4300,31	337,23	4479,8	369,4	3486,9	305,1	5,7
8,52	3983,36	4300,43	337,58	4482,1	369,6	3484,6	305,5	5,7
8,53	3983,93	4300,55	337,12	4481,0	369,4	3486,9	304,8	5,7
8,55	3983,93	4300,66	336,89	4482,1	368,9	3485,7	304,8	5,7
8,57	3983,36	4300,78	337,23	4482,1	368,9	3484,6	305,5	5,7
8,58	3983,35	4300,89	336,78	4479,8	368,9	3486,9	304,6	5,7
8,60	3982,21	4301,01	336,89	4481,0	368,7	3483,5	305,1	5,7
8,62	3982,78	4301,12	337,00	4481,0	368,9	3484,6	305,1	5,7
8,63	3982,20	4301,23	337,00	4479,8	368,9	3484,6	305,1	5,7
8,65	3983,93	4301,35	336,77	4481,0	368,5	3486,9	305,1	5,7
8,67	3983,93	4301,46	337,35	4481,0	369,6	3486,9	305,1	5,7
8,68	3983,93	4301,57	337,00	4481,0	368,9	3486,9	305,1	5,7
8,70	3985,08	4301,68	337,35	4482,1	369,4	3488,0	305,3	5,7
8,72	3983,93	4301,79	337,35	4481,0	369,4	3486,9	305,3	5,7
8,73	3983,93	4301,90	337,35	4481,0	369,2	3486,9	305,5	5,7
8,75	3982,20	4302,01	337,12	4479,8	368,9	3484,6	305,3	5,7
8,77	3982,19	4302,12	337,00	4478,7	368,9	3485,7	305,1	5,7
8,78	3981,61	4302,23	336,89	4477,5	368,7	3485,7	305,1	5,7
8,80	3983,35	4302,34	337,23	4479,8	368,9	3486,9	305,5	5,7
8,82	3982,20	4302,45	337,12	4479,8	368,9	3484,6	305,3	5,7
8,83	3985,08	4302,56	337,35	4482,1	369,4	3488,0	305,3	5,7
8,85	3986,22	4302,66	337,35	4482,1	369,2	3490,3	305,5	5,7
8,87	3984,50	4302,77	337,46	4481,0	369,4	3488,0	305,5	5,7
8,88	3983,93	4302,88	337,35	4481,0	369,4	3486,9	305,3	5,7
8,90	3982,77	4302,98	337,35	4479,8	368,9	3485,7	305,7	5,7
8,92	3984,51	4303,09	337,23	4482,1	369,2	3486,9	305,3	5,7
8,93	3983,93	4303,19	337,23	4481,0	368,9	3486,9	305,5	5,7
8,95	3984,51	4303,30	337,12	4482,1	368,9	3486,9	305,3	5,7
8,97	3984,51	4303,40	337,23	4482,1	368,9	3486,9	305,5	5,7
8,98	3983,35	4303,51	337,46	4481,0	369,4	3485,7	305,5	5,7
9,00	3985,65	4303,61	337,58	4482,1	369,2	3489,2	306,0	5,7
9,02	3985,08	4303,71	337,69	4482,1	369,4	3488,0	306,0	5,7
9,03	3984,50	4303,82	337,35	4481,0	368,9	3488,0	305,7	5,7
9,05	3985,08	4303,92	337,46	4482,1	369,4	3488,0	305,5	5,7
9,07	3984,50	4304,02	337,23	4481,0	368,9	3488,0	305,5	5,7
9,08	3983,35	4304,12	337,23	4479,8	368,9	3486,9	305,5	5,7
9,10	3983,92	4304,22	336,89	4479,8	368,5	3488,0	305,3	5,7
9,12	3984,51	4304,32	337,12	4482,1	368,7	3486,9	305,5	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
9,13	3983,93	4304,42	337,12	4481,0	368,7	3486,9	305,5	5,7
9,15	3982,77	4304,52	337,35	4479,8	368,7	3485,7	306,0	5,6
9,17	3982,20	4304,62	337,69	4479,8	369,4	3484,6	306,0	5,7
9,18	3985,65	4304,72	337,58	4482,1	369,2	3489,2	306,0	5,7
9,20	3985,66	4304,82	337,46	4483,3	368,9	3488,0	306,0	5,7
9,22	3984,51	4304,92	337,69	4482,1	369,4	3486,9	306,0	5,7
9,23	3984,51	4305,02	337,35	4482,1	369,2	3486,9	305,5	5,7
9,25	3983,92	4305,12	337,12	4479,8	368,5	3488,0	305,7	5,7
9,27	3983,93	4305,21	336,77	4481,0	368,5	3486,9	305,1	5,6
9,28	3983,35	4305,31	337,35	4481,0	368,7	3485,7	306,0	5,7
9,30	3984,51	4305,40	337,23	4482,1	368,7	3486,9	305,7	5,6
9,32	3983,93	4305,50	337,46	4481,0	368,9	3486,9	306,0	5,7
9,33	3985,08	4305,60	337,23	4482,1	368,9	3488,0	305,5	5,7
9,35	3985,66	4305,69	337,23	4483,3	368,5	3488,0	306,0	5,7
9,37	3984,51	4305,79	337,23	4482,1	368,5	3486,9	306,0	5,7
9,38	3985,08	4305,88	337,35	4482,1	368,7	3488,0	306,0	5,7
9,40	3985,08	4305,97	337,58	4482,1	368,9	3488,0	306,2	5,7
9,42	3983,93	4306,07	337,46	4481,0	369,2	3486,9	305,7	5,7
9,43	3985,08	4306,16	337,23	4482,1	368,5	3488,0	306,0	5,6
9,45	3981,63	4306,25	337,00	4479,8	368,0	3483,5	306,0	5,7
9,47	3983,35	4306,35	336,89	4481,0	368,0	3485,7	305,7	5,6
9,48	3984,51	4306,44	337,23	4482,1	368,5	3486,9	306,0	5,7
9,50	3983,93	4306,53	337,46	4481,0	368,9	3486,9	306,0	5,7
9,52	3984,50	4306,62	337,12	4481,0	368,5	3488,0	305,7	5,7
9,53	3987,39	4306,71	337,81	4485,6	369,2	3489,2	306,4	5,7
9,55	3985,66	4306,80	337,12	4483,3	368,3	3488,0	306,0	5,7
9,57	3986,23	4306,89	337,23	4483,3	368,5	3489,2	306,0	5,7
9,58	3985,65	4306,98	337,46	4482,1	368,9	3489,2	306,0	5,7
9,60	3985,08	4307,07	337,46	4482,1	368,7	3488,0	306,2	5,6
9,62	3983,35	4307,16	337,23	4479,8	368,5	3486,9	306,0	5,6
9,63	3983,93	4307,25	337,23	4482,1	368,5	3485,7	306,0	5,7
9,65	3985,08	4307,34	337,00	4482,1	368,0	3488,0	306,0	5,6
9,67	3983,35	4307,43	337,58	4481,0	368,7	3485,7	306,4	5,7
9,68	3985,67	4307,51	337,23	4484,5	368,5	3486,9	306,0	5,7
9,70	3985,65	4307,60	337,23	4482,1	368,5	3489,2	306,0	5,7
9,72	3985,07	4307,69	337,46	4481,0	368,5	3489,2	306,4	5,7
9,73	3985,66	4307,77	337,58	4483,3	368,7	3488,0	306,4	5,6
9,75	3984,50	4307,86	337,35	4481,0	368,5	3488,0	306,2	5,7
9,77	3985,08	4307,95	337,00	4482,1	368,0	3488,0	306,0	5,6
9,78	3985,66	4308,03	337,12	4483,3	368,0	3488,0	306,2	5,6
9,80	3983,93	4308,12	337,12	4482,1	368,0	3485,7	306,2	5,7
9,82	3985,08	4308,20	337,46	4482,1	368,5	3488,0	306,4	5,7
9,83	3987,37	4308,29	337,69	4483,3	368,5	3491,4	306,9	5,7
9,85	3986,22	4308,37	337,23	4482,1	368,0	3490,3	306,4	5,7
9,87	3985,08	4308,45	337,69	4482,1	368,9	3488,0	306,4	5,7
9,88	3985,07	4308,54	337,23	4481,0	368,5	3489,2	306,0	5,7
9,90	3985,65	4308,62	337,46	4482,1	368,5	3489,2	306,4	5,6
9,92	3986,22	4308,70	337,35	4482,1	368,5	3490,3	306,2	5,6
9,93	3985,65	4308,79	337,12	4482,1	368,0	3489,2	306,2	5,6
9,95	3984,51	4308,87	337,46	4482,1	368,5	3486,9	306,4	5,6
9,97	3986,81	4308,95	337,81	4484,5	368,9	3489,2	306,7	5,6
9,98	3987,96	4309,03	337,58	4485,6	368,7	3490,3	306,4	5,7
10,00	3985,65	4309,11	337,46	4482,1	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,02	3985,65	4309,19	337,46	4482,1	368,3	3489,2	306,7	5,7
10,03	3986,23	4309,27	337,58	4483,3	368,5	3489,2	306,7	5,7

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
10,05	3986,22	4309,35	337,23	4482,1	368,0	3490,3	306,4	5,6
10,07	3983,93	4309,43	337,23	4481,0	368,0	3486,9	306,4	5,6
10,08	3984,51	4309,51	337,23	4482,1	368,0	3486,9	306,4	5,6
10,10	3985,65	4309,59	337,35	4482,1	368,0	3489,2	306,7	5,6
10,12	3986,22	4309,67	337,35	4482,1	368,0	3490,3	306,7	5,6
10,13	3986,79	4309,75	337,46	4482,1	368,0	3491,4	306,9	5,7
10,15	3988,52	4309,83	337,46	4484,5	368,3	3492,6	306,7	5,6
10,17	3987,39	4309,90	337,46	4485,6	368,5	3489,2	306,4	5,6
10,18	3986,22	4309,98	337,35	4482,1	368,5	3490,3	306,2	5,6
10,20	3985,09	4310,06	337,23	4483,3	368,0	3486,9	306,4	5,6
10,22	3986,23	4310,14	337,35	4483,3	368,3	3489,2	306,4	5,6
10,23	3985,65	4310,21	337,46	4482,1	368,0	3489,2	306,9	5,7
10,25	3986,23	4310,29	337,23	4483,3	367,8	3489,2	306,7	5,6
10,27	3986,80	4310,37	337,23	4483,3	368,0	3490,3	306,4	5,6
10,28	3986,23	4310,44	337,35	4483,3	368,0	3489,2	306,7	5,6
10,30	3987,39	4310,52	337,35	4485,6	368,5	3489,2	306,2	5,6
10,32	3987,95	4310,59	337,58	4484,5	368,0	3491,4	307,1	5,6
10,33	3987,38	4310,67	337,23	4484,5	368,0	3490,3	306,4	5,6
10,35	3985,65	4310,74	337,23	4482,1	368,0	3489,2	306,4	5,6
10,37	3987,38	4310,81	337,35	4484,5	368,0	3490,3	306,7	5,6
10,38	3985,09	4310,89	337,58	4483,3	368,5	3486,9	306,7	5,6
10,40	3985,65	4310,96	337,46	4482,1	368,3	3489,2	306,7	5,6
10,42	3985,66	4311,04	337,46	4483,3	368,0	3488,0	306,9	5,6
10,43	3986,22	4311,11	337,46	4482,1	368,0	3490,3	306,9	5,6
10,45	3986,81	4311,18	337,23	4484,5	368,0	3489,2	306,4	5,6
10,47	3987,37	4311,25	337,58	4483,3	368,0	3491,4	307,1	5,7
10,48	3987,37	4311,33	337,35	4483,3	368,0	3491,4	306,7	5,6
10,50	3987,38	4311,40	337,23	4484,5	367,6	3490,3	306,9	5,6
10,52	3985,65	4311,47	337,12	4482,1	367,8	3489,2	306,4	5,6
10,53	3985,65	4311,54	337,12	4482,1	367,6	3489,2	306,7	5,6
10,55	3986,81	4311,61	337,12	4484,5	367,8	3489,2	306,4	5,6
10,57	3985,65	4311,68	337,46	4482,1	367,8	3489,2	307,1	5,6
10,58	3985,65	4311,75	337,35	4482,1	367,8	3489,2	306,9	5,6
10,60	3986,81	4311,82	337,46	4484,5	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,62	3989,10	4311,89	337,58	4485,6	368,0	3492,6	307,1	5,6
10,63	3987,38	4311,96	337,35	4484,5	367,8	3490,3	306,9	5,7
10,65	3985,65	4312,03	337,46	4482,1	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,67	3986,23	4312,10	337,46	4483,3	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,68	3985,65	4312,17	337,23	4482,1	367,8	3489,2	306,7	5,6
10,70	3985,65	4312,24	337,46	4482,1	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,72	3986,23	4312,31	337,46	4483,3	368,0	3489,2	306,9	5,6
10,73	3986,81	4312,37	337,35	4484,5	368,0	3489,2	306,7	5,6
10,75	3988,52	4312,44	337,69	4484,5	368,0	3492,6	307,4	5,6
10,77	3989,12	4312,51	337,58	4487,9	368,0	3490,3	307,1	5,7
10,78	3989,67	4312,57	337,69	4485,6	368,0	3493,7	307,4	5,6
10,80	3987,95	4312,64	337,35	4484,5	367,8	3491,4	306,9	5,6
10,82	3987,38	4312,71	337,35	4484,5	367,8	3490,3	306,9	5,6
10,83	3985,65	4312,77	337,12	4482,1	367,3	3489,2	306,9	5,6
10,85	3986,23	4312,84	337,23	4483,3	367,6	3489,2	306,9	5,6
10,87	3986,80	4312,91	337,58	4483,3	368,0	3490,3	307,1	5,6
10,88	3986,81	4312,97	337,58	4484,5	368,0	3489,2	307,1	5,6
10,90	3987,96	4313,04	337,35	4485,6	367,8	3490,3	306,9	5,6
10,92	3989,10	4313,10	337,46	4485,6	368,0	3492,6	306,9	5,6
10,93	3988,50	4313,17	337,46	4482,1	367,6	3494,9	307,4	5,6
10,95	3989,10	4313,23	337,69	4485,6	368,0	3492,6	307,4	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
10,97	3988,53	4313,29	337,58	4485,6	367,8	3491,4	307,4	5,6
10,98	3988,52	4313,36	337,58	4484,5	368,0	3492,6	307,1	5,7
11,00	3986,23	4313,42	337,23	4483,3	367,6	3489,2	306,9	5,6
11,02	3986,22	4313,49	337,35	4482,1	367,6	3490,3	307,1	5,6
11,03	3986,22	4313,55	337,00	4482,1	367,1	3490,3	306,9	5,6
11,05	3987,95	4313,61	337,58	4484,5	367,8	3491,4	307,4	5,6
11,07	3986,23	4313,67	337,58	4483,3	368,0	3489,2	307,1	5,6
11,08	3988,53	4313,74	337,69	4485,6	368,0	3491,4	307,4	5,6
11,10	3989,11	4313,80	337,92	4486,8	368,0	3491,4	307,8	5,6
11,12	3988,52	4313,86	337,69	4484,5	367,8	3492,6	307,6	5,6
11,13	3987,95	4313,92	337,57	4484,5	367,6	3491,4	307,6	5,6
11,15	3988,53	4313,98	337,58	4485,6	367,8	3491,4	307,4	5,6
11,17	3986,79	4314,04	337,35	4482,1	367,8	3491,4	306,9	5,6
11,18	3987,37	4314,11	337,46	4483,3	367,6	3491,4	307,4	5,6
11,20	3988,52	4314,17	337,46	4484,5	367,6	3492,6	307,4	5,6
11,22	3988,54	4314,23	337,80	4486,8	367,8	3490,3	307,8	5,6
11,23	3986,80	4314,29	337,58	4483,3	367,8	3490,3	307,4	5,6
11,25	3988,52	4314,35	337,57	4484,5	367,6	3492,6	307,6	5,6
11,27	3989,11	4314,41	338,03	4486,8	368,0	3491,4	308,0	5,6
11,28	3989,11	4314,47	338,03	4486,8	368,0	3491,4	308,0	5,6
11,30	3987,36	4314,52	337,58	4482,1	367,8	3492,6	307,4	5,6
11,32	3987,95	4314,58	337,00	4484,5	367,3	3491,4	306,7	5,6
11,33	3987,38	4314,64	337,35	4484,5	367,6	3490,3	307,1	5,6
11,35	3987,38	4314,70	337,58	4484,5	367,8	3490,3	307,4	5,6
11,37	3986,79	4314,76	337,46	4482,1	367,6	3491,4	307,4	5,6
11,38	3987,37	4314,82	337,57	4483,3	367,6	3491,4	307,6	5,6
11,40	3987,38	4314,87	337,23	4484,5	367,1	3490,3	307,4	5,6
11,42	3989,66	4314,93	337,69	4484,5	368,0	3494,9	307,4	5,6
11,43	3989,11	4314,99	337,57	4486,8	367,6	3491,4	307,6	5,6
11,45	3987,95	4315,05	337,69	4484,5	367,8	3491,4	307,6	5,6
11,47	3988,52	4315,10	337,35	4484,5	367,6	3492,6	307,1	5,6
11,48	3987,38	4315,16	337,46	4484,5	367,6	3490,3	307,4	5,6
11,50	3986,21	4315,22	337,23	4481,0	366,9	3491,4	307,6	5,6
11,52	3987,95	4315,27	337,23	4484,5	367,1	3491,4	307,4	5,6
11,53	3987,94	4315,33	337,23	4483,3	367,1	3492,6	307,4	5,6
11,55	3988,52	4315,38	337,35	4484,5	367,3	3492,6	307,4	5,6
11,57	3990,82	4315,44	337,35	4486,8	367,3	3494,9	307,4	5,6
11,58	3989,66	4315,49	337,57	4484,5	367,1	3494,9	308,0	5,6
11,60	3987,95	4315,55	337,57	4484,5	367,6	3491,4	307,6	5,6
11,62	3988,53	4315,60	337,69	4485,6	367,3	3491,4	308,0	5,6
11,63	3989,10	4315,66	337,46	4485,6	367,6	3492,6	307,4	5,6
11,65	3987,38	4315,71	337,23	4484,5	367,1	3490,3	307,4	5,6
11,67	3987,37	4315,77	337,46	4483,3	367,3	3491,4	307,6	5,6
11,68	3987,95	4315,82	337,35	4484,5	367,3	3491,4	307,4	5,6
11,70	3987,38	4315,88	337,35	4484,5	367,3	3490,3	307,4	5,6
11,72	3988,52	4315,93	337,12	4484,5	366,7	3492,6	307,6	5,6
11,73	3991,40	4315,98	337,80	4486,8	367,6	3496,0	308,0	5,6
11,75	3990,82	4316,04	337,80	4485,6	367,8	3496,0	307,8	5,6
11,77	3989,67	4316,09	337,69	4485,6	367,6	3493,7	307,8	5,6
11,78	3988,52	4316,14	337,35	4484,5	367,1	3492,6	307,6	5,6
11,80	3988,52	4316,19	337,57	4484,5	367,1	3492,6	308,0	5,6
11,82	3988,52	4316,25	337,35	4484,5	367,3	3492,6	307,4	5,6
11,83	3987,38	4316,30	336,66	4484,5	366,2	3490,3	307,1	5,6
11,85	3986,79	4316,35	337,12	4482,1	367,1	3491,4	307,1	5,6
11,87	3988,52	4316,40	337,12	4484,5	366,9	3492,6	307,4	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
11,88	3988,53	4316,45	337,58	4485,6	367,8	3491,4	307,4	5,6
11,90	3989,67	4316,50	337,46	4485,6	367,3	3493,7	307,6	5,6
11,92	3990,82	4316,55	337,46	4485,6	367,3	3496,0	307,6	5,6
11,93	3989,09	4316,61	337,57	4484,5	367,6	3493,7	307,6	5,6
11,95	3988,52	4316,66	337,57	4484,5	367,6	3492,6	307,6	5,6
11,97	3989,67	4316,71	337,23	4485,6	366,9	3493,7	307,6	5,6
11,98	3990,25	4316,76	337,35	4486,8	367,1	3493,7	307,6	5,6
12,00	3987,38	4316,81	337,12	4484,5	366,9	3490,3	307,4	5,6
12,02	3986,22	4316,86	337,12	4482,1	366,9	3490,3	307,4	5,6
12,03	3988,53	4316,91	337,12	4485,6	366,4	3491,4	307,8	5,6
12,05	3989,09	4316,96	337,69	4484,5	367,3	3493,7	308,0	5,6
12,07	3991,40	4317,00	337,00	4486,8	366,7	3496,0	307,4	5,6
12,08	3990,82	4317,05	337,92	4485,6	367,6	3496,0	308,3	5,6
12,10	3989,11	4317,10	337,57	4486,8	367,3	3491,4	307,8	5,6
12,12	3989,67	4317,15	337,69	4485,6	367,1	3493,7	308,3	5,6
12,13	3989,10	4317,20	337,12	4485,6	366,7	3492,6	307,6	5,6
12,15	3989,68	4317,25	337,00	4486,8	366,7	3492,6	307,4	5,6
12,17	3987,95	4317,30	337,12	4484,5	366,9	3491,4	307,4	5,6
12,18	3988,52	4317,34	337,46	4484,5	367,1	3492,6	307,8	5,6
12,20	3989,09	4317,39	337,23	4484,5	367,1	3493,7	307,4	5,6
12,22	3990,25	4317,44	337,92	4486,8	367,3	3493,7	308,5	5,6
12,23	3991,40	4317,49	338,03	4486,8	367,6	3496,0	308,5	5,6
12,25	3990,25	4317,53	337,80	4486,8	367,3	3493,7	308,3	5,6
12,27	3990,25	4317,58	337,69	4486,8	367,1	3493,7	308,3	5,6
12,28	3990,24	4317,63	337,57	4484,5	367,3	3496,0	307,8	5,6
12,30	3987,95	4317,67	337,00	4484,5	366,7	3491,4	307,4	5,6
12,32	3988,52	4317,72	336,77	4484,5	366,4	3492,6	307,1	5,6
12,33	3989,67	4317,77	337,00	4485,6	366,7	3493,7	307,4	5,6
12,35	3989,68	4317,81	337,23	4486,8	366,7	3492,6	307,8	5,6
12,37	3987,95	4317,86	337,00	4484,5	366,2	3491,4	307,8	5,6
12,38	3991,98	4317,90	337,69	4487,9	367,1	3496,0	308,3	5,6
12,40	3991,97	4317,95	337,46	4486,8	366,9	3497,2	308,0	5,6
12,42	3990,25	4317,99	337,57	4486,8	366,9	3493,7	308,3	5,6
12,43	3988,52	4318,04	337,57	4484,5	367,1	3492,6	308,0	5,6
12,45	3988,52	4318,08	337,23	4484,5	366,2	3492,6	308,3	5,6
12,47	3988,53	4318,13	337,23	4485,6	366,9	3491,4	307,6	5,6
12,48	3990,24	4318,17	337,57	4485,6	366,9	3494,9	308,3	5,6
12,50	3989,67	4318,22	337,12	4485,6	366,4	3493,7	307,8	5,6
12,52	3989,10	4318,26	337,23	4485,6	366,7	3492,6	307,8	5,6
12,53	3989,66	4318,31	337,46	4484,5	366,7	3494,9	308,3	5,6
12,55	3990,83	4318,35	337,69	4487,9	367,1	3493,7	308,3	5,6
12,57	3991,40	4318,39	337,69	4486,8	366,9	3496,0	308,5	5,6
12,58	3991,97	4318,44	337,34	4486,8	366,9	3497,2	307,8	5,6
12,60	3989,10	4318,48	337,46	4485,6	366,9	3492,6	308,0	5,6
12,62	3987,38	4318,52	337,12	4484,5	366,4	3490,3	307,8	5,6
12,63	3988,52	4318,57	337,23	4484,5	366,2	3492,6	308,3	5,6
12,65	3991,40	4318,61	337,12	4486,8	366,4	3496,0	307,8	5,6
12,67	3990,82	4318,65	337,69	4485,6	366,9	3496,0	308,5	5,6
12,68	3991,96	4318,69	337,34	4485,6	366,7	3498,3	308,0	5,6
12,70	3994,27	4318,74	337,80	4489,1	367,1	3499,4	308,5	5,6
12,72	3989,68	4318,78	337,80	4486,8	367,1	3492,6	308,5	5,6
12,73	3990,82	4318,82	336,77	4485,6	365,7	3496,0	307,8	5,6
12,75	3989,66	4318,86	337,34	4484,5	366,7	3494,9	308,0	5,6
12,77	3989,09	4318,90	337,34	4484,5	366,7	3493,7	308,0	5,6
12,78	3988,53	4318,95	337,00	4485,6	366,7	3491,4	307,4	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
12,80	3989,10	4318,99	336,77	4485,6	366,0	3492,6	307,6	5,6
12,82	3990,82	4319,03	337,11	4485,6	366,2	3496,0	308,0	5,6
12,83	3991,39	4319,07	337,34	4485,6	366,7	3497,2	308,0	5,6
12,85	3991,98	4319,11	337,46	4487,9	366,9	3496,0	308,0	5,6
12,87	3989,67	4319,15	337,46	4485,6	366,4	3493,7	308,5	5,6
12,88	3992,55	4319,19	337,57	4487,9	366,9	3497,2	308,3	5,6
12,90	3991,40	4319,23	337,57	4486,8	366,7	3496,0	308,5	5,6
12,92	3990,24	4319,27	337,00	4485,6	366,2	3494,9	307,8	5,6
12,93	3989,67	4319,31	336,89	4485,6	366,4	3493,7	307,4	5,6
12,95	3991,40	4319,35	337,34	4486,8	366,7	3496,0	308,0	5,6
12,97	3990,24	4319,39	337,46	4485,6	366,7	3494,9	308,3	5,6
12,98	3991,40	4319,43	337,57	4486,8	366,9	3496,0	308,3	5,6
13,00	3991,40	4319,47	337,23	4486,8	366,7	3496,0	307,8	5,6
13,02	3990,24	4319,51	337,46	4484,5	366,7	3496,0	308,3	5,6
13,03	3990,82	4319,55	337,23	4485,6	366,7	3496,0	307,8	5,6
13,05	3990,82	4319,59	337,00	4485,6	366,2	3496,0	307,8	5,6
13,07	3988,51	4319,63	337,57	4483,3	366,9	3493,7	308,3	5,6
13,08	3989,09	4319,66	336,77	4484,5	365,7	3493,7	307,8	5,6
13,10	3990,24	4319,70	337,12	4485,6	366,4	3494,9	307,8	5,6
13,12	3989,68	4319,74	337,11	4486,8	366,2	3492,6	308,0	5,6
13,13	3991,40	4319,78	337,23	4487,9	366,4	3494,9	308,0	5,6
13,15	3990,24	4319,82	337,46	4485,6	366,7	3494,9	308,3	5,6
13,17	3990,24	4319,86	337,46	4484,5	366,4	3496,0	308,5	5,6
13,18	3991,40	4319,89	337,34	4486,8	366,2	3496,0	308,5	5,6
13,20	3990,82	4319,93	337,57	4485,6	366,7	3496,0	308,5	5,6
13,22	3991,40	4319,97	337,00	4486,8	365,7	3496,0	308,3	5,6
13,23	3991,40	4320,01	337,23	4486,8	366,0	3496,0	308,5	5,6
13,25	3989,66	4320,04	337,11	4484,5	366,0	3494,9	308,3	5,6
13,27	3989,67	4320,08	337,11	4485,6	365,7	3493,7	308,5	5,6
13,28	3990,82	4320,12	337,11	4485,6	366,2	3496,0	308,0	5,6
13,30	3990,25	4320,15	337,57	4486,8	366,4	3493,7	308,7	5,6
13,32	3991,97	4320,19	337,57	4486,8	366,7	3497,2	308,5	5,6
13,33	3993,70	4320,23	337,46	4489,1	366,2	3498,3	308,7	5,6
13,35	3991,40	4320,26	337,23	4486,8	366,0	3496,0	308,5	5,6
13,37	3991,97	4320,30	337,57	4486,8	366,2	3497,2	309,0	5,6
13,38	3991,98	4320,33	337,23	4487,9	365,7	3496,0	308,7	5,6
13,40	3990,82	4320,37	337,23	4485,6	366,2	3496,0	308,3	5,6
13,42	3989,09	4320,41	337,00	4484,5	365,7	3493,7	308,3	5,6
13,43	3989,66	4320,44	336,89	4484,5	366,0	3494,9	307,8	5,6
13,45	3989,67	4320,48	336,77	4485,6	365,7	3493,7	307,8	5,6
13,47	3990,82	4320,51	337,11	4486,8	365,7	3494,9	308,5	5,6
13,48	3991,38	4320,55	337,34	4484,5	366,2	3498,3	308,5	5,6
13,50	3991,97	4320,58	337,57	4486,8	366,7	3497,2	308,5	5,6
13,52	3993,71	4320,62	337,46	4490,3	366,2	3497,2	308,7	5,6
13,53	3992,54	4320,65	337,23	4486,8	365,7	3498,3	308,7	5,6
13,55	3990,25	4320,69	337,00	4486,8	365,5	3493,7	308,5	5,6
13,57	3990,25	4320,72	337,34	4486,8	365,7	3493,7	309,0	5,6
13,58	3990,82	4320,76	337,11	4485,6	365,7	3496,0	308,5	5,6
13,60	3989,09	4320,79	337,00	4484,5	365,7	3493,7	308,3	5,6
13,62	3989,68	4320,82	337,23	4486,8	366,0	3492,6	308,5	5,6
13,63	3990,82	4320,86	337,34	4485,6	365,7	3496,0	309,0	5,6
13,65	3990,24	4320,89	337,00	4485,6	365,5	3494,9	308,5	5,6
13,67	3991,97	4320,93	337,57	4486,8	366,4	3497,2	308,7	5,6
13,68	3991,40	4320,96	337,46	4487,9	366,0	3494,9	309,0	5,6
13,70	3989,67	4320,99	337,23	4485,6	365,7	3493,7	308,7	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
13,72	3991,40	4321,03	337,11	4486,8	365,5	3496,0	308,7	5,6
13,73	3990,81	4321,06	337,34	4484,5	365,7	3497,2	309,0	5,6
13,75	3990,24	4321,09	337,00	4485,6	365,7	3494,9	308,3	5,6
13,77	3990,25	4321,12	337,00	4486,8	365,5	3493,7	308,5	5,6
13,78	3990,82	4321,16	337,11	4485,6	365,7	3496,0	308,5	5,6
13,80	3991,97	4321,19	337,34	4486,8	365,7	3497,2	309,0	5,6
13,82	3991,97	4321,22	337,11	4486,8	365,7	3497,2	308,5	5,6
13,83	3991,95	4321,26	337,57	4484,5	366,0	3499,4	309,2	5,6
13,85	3991,40	4321,29	337,00	4486,8	365,3	3496,0	308,7	5,6
13,87	3990,82	4321,32	337,00	4486,8	365,7	3494,9	308,3	5,6
13,88	3989,08	4321,35	336,77	4482,1	365,3	3496,0	308,3	5,6
13,90	3989,67	4321,38	336,65	4485,6	365,0	3493,7	308,3	5,6
13,92	3991,40	4321,42	336,77	4487,9	365,3	3494,9	308,3	5,6
13,93	3991,40	4321,45	337,00	4486,8	365,5	3496,0	308,5	5,6
13,95	3990,82	4321,48	337,00	4485,6	365,7	3496,0	308,3	5,6
13,97	3992,55	4321,51	337,57	4487,9	366,0	3497,2	309,2	5,6
13,98	3991,40	4321,54	336,88	4486,8	365,3	3496,0	308,5	5,6
14,00	3991,97	4321,57	337,23	4486,8	365,7	3497,2	308,7	5,6
14,02	3990,82	4321,60	337,00	4486,8	365,3	3494,9	308,7	5,6
14,03	3988,52	4321,63	336,88	4484,5	365,0	3492,6	308,7	5,6
14,05	3991,39	4321,67	337,00	4485,6	365,3	3497,2	308,7	5,6
14,07	3989,67	4321,70	337,00	4485,6	365,3	3493,7	308,7	5,6
14,08	3991,40	4321,73	337,11	4486,8	365,7	3496,0	308,5	5,6
14,10	3991,97	4321,76	337,23	4486,8	365,7	3497,2	308,7	5,6
14,12	3989,09	4321,79	337,23	4484,5	365,5	3493,7	309,0	5,6
14,13	3990,25	4321,82	337,11	4486,8	365,5	3493,7	308,7	5,6
14,15	3990,82	4321,85	336,88	4486,8	365,3	3494,9	308,5	5,6
14,17	3991,98	4321,88	336,88	4487,9	365,3	3496,0	308,5	5,6
14,18	3989,67	4321,91	336,65	4485,6	364,8	3493,7	308,5	5,6
14,20	3991,40	4321,94	337,00	4487,9	365,3	3494,9	308,7	5,6
14,22	3991,97	4321,97	337,23	4486,8	365,3	3497,2	309,2	5,6
14,23	3993,12	4322,00	337,11	4487,9	365,3	3498,3	309,0	5,6
14,25	3991,97	4322,03	337,00	4486,8	365,3	3497,2	308,7	5,6
14,27	3990,25	4322,05	337,00	4486,8	365,3	3493,7	308,7	5,6
14,28	3988,51	4322,08	336,54	4483,3	364,8	3493,7	308,3	5,6
14,30	3990,24	4322,11	336,54	4484,5	364,8	3496,0	308,3	5,6
14,32	3989,09	4322,14	336,65	4484,5	365,0	3493,7	308,3	5,6
14,33	3989,67	4322,17	336,65	4485,6	365,0	3493,7	308,3	5,6
14,35	3989,67	4322,20	336,88	4485,6	365,3	3493,7	308,5	5,6
14,37	3993,13	4322,23	337,46	4489,1	365,7	3497,2	309,2	5,6
14,38	3994,27	4322,26	337,00	4489,1	365,3	3499,4	308,7	5,6
14,40	3991,98	4322,28	336,88	4487,9	365,3	3496,0	308,5	5,6
14,42	3992,56	4322,31	337,11	4489,1	365,3	3496,0	309,0	5,6
14,43	3991,40	4322,34	336,77	4486,8	365,0	3496,0	308,5	5,6
14,45	3989,10	4322,37	336,77	4485,6	365,0	3492,6	308,5	5,6
14,47	3991,97	4322,40	336,77	4486,8	364,8	3497,2	308,7	5,6
14,48	3991,39	4322,43	336,77	4485,6	365,0	3497,2	308,5	5,6
14,50	3990,24	4322,45	336,77	4484,5	365,0	3496,0	308,5	5,6
14,52	3990,82	4322,48	336,88	4486,8	365,0	3494,9	308,7	5,6
14,53	3991,40	4322,51	337,11	4486,8	365,3	3496,0	309,0	5,6
14,55	3990,82	4322,54	336,77	4485,6	364,8	3496,0	308,7	5,6
14,57	3992,55	4322,56	337,11	4487,9	365,3	3497,2	309,0	5,6
14,58	3992,55	4322,59	336,88	4487,9	365,0	3497,2	308,7	5,6
14,60	3991,97	4322,62	337,00	4486,8	365,5	3497,2	308,5	5,6
14,62	3990,24	4322,64	336,65	4484,5	364,8	3496,0	308,5	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
14,63	3990,24	4322,67	337,00	4484,5	365,0	3496,0	309,0	5,6
14,65	3992,55	4322,70	336,65	4487,9	364,8	3497,2	308,5	5,6
14,67	3991,40	4322,72	336,88	4486,8	365,0	3496,0	308,7	5,6
14,68	3991,98	4322,75	336,65	4487,9	364,6	3496,0	308,7	5,6
14,70	3991,39	4322,78	337,11	4485,6	365,3	3497,2	309,0	5,6
14,72	3992,54	4322,80	336,65	4486,8	364,6	3498,3	308,7	5,6
14,73	3993,69	4322,83	336,43	4487,9	364,6	3499,4	308,3	5,6
14,75	3990,81	4322,86	336,88	4484,5	365,0	3497,2	308,7	5,6
14,77	3990,24	4322,88	336,65	4484,5	364,8	3496,0	308,5	5,6
14,78	3993,14	4322,91	336,65	4490,3	364,8	3496,0	308,5	5,6
14,80	3990,25	4322,93	336,54	4486,8	364,4	3493,7	308,7	5,6
14,82	3991,40	4322,96	336,77	4487,9	364,4	3494,9	309,2	5,6
14,83	3990,82	4322,99	336,77	4486,8	365,0	3494,9	308,5	5,6
14,85	3991,40	4323,01	336,42	4486,8	364,1	3496,0	308,7	5,6
14,87	3991,40	4323,04	336,54	4487,9	364,6	3494,9	308,5	5,6
14,88	3993,12	4323,06	336,77	4487,9	364,8	3498,3	308,7	5,6
14,90	3992,54	4323,09	337,00	4486,8	364,8	3498,3	309,2	5,6
14,92	3991,40	4323,11	336,88	4486,8	365,0	3496,0	308,7	5,6
14,93	3990,82	4323,14	336,65	4485,6	364,6	3496,0	308,7	5,6
14,95	3989,08	4323,16	336,54	4483,3	364,6	3494,9	308,5	5,6
14,97	3990,24	4323,19	336,77	4484,5	365,0	3496,0	308,5	5,6
14,98	3990,81	4323,21	336,77	4484,5	364,4	3497,2	309,2	5,6
15,00	3991,40	4323,24	336,43	4486,8	364,6	3496,0	308,3	5,6
15,02	3995,42	4323,26	336,88	4490,3	364,8	3500,6	309,0	5,6
15,03	3993,13	4323,29	336,88	4489,1	365,0	3497,2	308,7	5,6
15,05	3991,40	4323,31	336,65	4486,8	364,6	3496,0	308,7	5,6
15,07	3993,12	4323,34	336,65	4487,9	364,6	3498,3	308,7	5,6
15,08	3992,55	4323,36	336,77	4487,9	364,8	3497,2	308,7	5,6
15,10	3990,81	4323,38	336,54	4484,5	364,6	3497,2	308,5	5,6
15,12	3990,24	4323,41	336,20	4485,6	364,1	3494,9	308,3	5,6
15,13	3990,25	4323,43	336,54	4486,8	364,4	3493,7	308,7	5,6
15,15	3990,81	4323,46	336,42	4484,5	364,4	3497,2	308,5	5,6
15,17	3990,82	4323,48	336,42	4486,8	364,4	3494,9	308,5	5,6
15,18	3993,71	4323,50	336,77	4490,3	364,8	3497,2	308,7	5,6
15,20	3993,14	4323,53	336,42	4490,3	364,1	3496,0	308,7	5,6
15,22	3991,97	4323,55	336,65	4486,8	364,6	3497,2	308,7	5,6
15,23	3991,97	4323,57	336,88	4486,8	364,8	3497,2	309,0	5,6
15,25	3991,40	4323,60	336,65	4486,8	364,4	3496,0	309,0	5,6
15,27	3991,40	4323,62	336,54	4486,8	364,4	3496,0	308,7	5,6
15,28	3991,98	4323,64	336,31	4487,9	364,4	3496,0	308,3	5,6
15,30	3991,97	4323,67	336,42	4486,8	364,4	3497,2	308,5	5,6
15,32	3991,97	4323,69	336,77	4486,8	364,8	3497,2	308,7	5,6
15,33	3992,55	4323,71	336,77	4487,9	364,8	3497,2	308,7	5,6
15,35	3991,97	4323,74	336,88	4486,8	364,8	3497,2	309,0	5,6
15,37	3992,54	4323,76	336,65	4486,8	364,4	3498,3	309,0	5,6
15,38	3991,40	4323,78	336,65	4486,8	364,6	3496,0	308,7	5,6
15,40	3991,40	4323,80	336,31	4486,8	364,4	3496,0	308,3	5,6
15,42	3990,81	4323,83	336,20	4484,5	363,9	3497,2	308,5	5,6
15,43	3991,40	4323,85	336,20	4486,8	364,1	3496,0	308,3	5,6
15,45	3990,82	4323,87	335,97	4485,6	363,7	3496,0	308,3	5,6
15,47	3991,98	4323,89	336,42	4487,9	363,9	3496,0	309,0	5,6
15,48	3994,27	4323,92	336,88	4489,1	364,8	3499,4	309,0	5,6
15,50	3991,97	4323,94	336,42	4486,8	364,4	3497,2	308,5	5,6
15,52	3991,40	4323,96	336,54	4486,8	364,4	3496,0	308,7	5,6
15,53	3991,40	4323,98	336,42	4486,8	364,1	3496,0	308,7	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
15,55	3989,66	4324,00	336,31	4484,5	364,1	3494,9	308,5	5,6
15,57	3990,82	4324,02	336,42	4486,8	364,4	3494,9	308,5	5,6
15,58	3990,24	4324,05	336,20	4485,6	363,9	3494,9	308,5	5,6
15,60	3992,56	4324,07	336,31	4489,1	363,9	3496,0	308,7	5,6
15,62	3993,70	4324,09	337,00	4489,1	364,8	3498,3	309,2	5,6
15,63	3993,13	4324,11	336,65	4489,1	364,4	3497,2	309,0	5,6
15,65	3992,55	4324,13	336,54	4487,9	364,4	3497,2	308,7	5,6
15,67	3992,54	4324,15	336,54	4486,8	364,1	3498,3	309,0	5,6
15,68	3991,97	4324,17	336,31	4486,8	363,9	3497,2	308,7	5,6
15,70	3989,66	4324,20	336,08	4484,5	363,9	3494,9	308,3	5,6
15,72	3990,24	4324,22	336,08	4485,6	363,9	3494,9	308,3	5,6
15,73	3990,24	4324,24	336,08	4484,5	363,9	3496,0	308,3	5,6
15,75	3993,13	4324,26	336,42	4489,1	364,1	3497,2	308,7	5,6
15,77	3991,39	4324,28	336,65	4485,6	364,4	3497,2	309,0	5,6
15,78	3990,82	4324,30	336,31	4485,6	363,9	3496,0	308,7	5,6
15,80	3993,70	4324,32	336,42	4489,1	364,1	3498,3	308,7	5,6
15,82	3991,38	4324,34	336,42	4484,5	363,9	3498,3	309,0	5,6
15,83	3990,81	4324,36	336,20	4484,5	363,9	3497,2	308,5	5,6
15,85	3992,54	4324,38	336,42	4486,8	364,1	3498,3	308,7	5,6
15,87	3992,55	4324,40	336,54	4487,9	364,4	3497,2	308,7	5,6
15,88	3990,81	4324,42	336,31	4484,5	364,1	3497,2	308,5	5,6
15,90	3990,25	4324,44	336,19	4486,8	363,7	3493,7	308,7	5,6
15,92	3991,40	4324,46	336,42	4486,8	364,1	3496,0	308,7	5,6
15,93	3993,12	4324,48	336,65	4487,9	364,4	3498,3	309,0	5,6
15,95	3994,28	4324,50	336,65	4490,3	364,4	3498,3	309,0	5,6
15,97	3994,85	4324,52	336,65	4490,3	364,1	3499,4	309,2	5,6
15,98	3993,70	4324,54	336,54	4489,1	364,1	3498,3	309,0	5,6
16,00	3992,55	4324,56	336,08	4487,9	363,4	3497,2	308,7	5,6
16,02	3990,24	4324,58	335,97	4484,5	363,9	3496,0	308,0	5,6
16,03	3991,96	4324,60	336,19	4485,6	363,7	3498,3	308,7	5,6
16,05	3990,82	4324,62	336,54	4485,6	364,1	3496,0	309,0	5,6
16,07	3991,97	4324,64	336,31	4486,8	363,9	3497,2	308,7	5,6
16,08	3993,71	4324,66	336,54	4490,3	364,1	3497,2	309,0	5,6
16,10	3991,40	4324,68	336,65	4486,8	364,1	3496,0	309,2	5,6
16,12	3992,54	4324,70	336,20	4486,8	363,9	3498,3	308,5	5,6
16,13	3992,55	4324,72	336,31	4487,9	363,9	3497,2	308,7	5,6
16,15	3992,54	4324,74	336,08	4486,8	363,4	3498,3	308,7	5,6
16,17	3990,81	4324,76	335,97	4484,5	363,7	3497,2	308,3	5,6
16,18	3991,98	4324,77	336,31	4487,9	363,9	3496,0	308,7	5,6
16,20	3991,98	4324,79	336,31	4487,9	363,9	3496,0	308,7	5,6
16,22	3991,39	4324,81	336,54	4485,6	363,9	3497,2	309,2	5,6
16,23	3990,82	4324,83	336,31	4485,6	363,4	3496,0	309,2	5,6
16,25	3993,10	4324,85	336,31	4485,6	363,4	3500,6	309,2	5,6
16,27	3993,11	4324,87	336,31	4486,8	363,7	3499,4	309,0	5,6
16,28	3993,11	4324,89	336,08	4486,8	363,2	3499,4	309,0	5,6
16,30	3992,55	4324,91	336,42	4487,9	363,9	3497,2	309,0	5,6
16,32	3991,97	4324,92	335,74	4486,8	363,2	3497,2	308,3	5,6
16,33	3990,24	4324,94	335,96	4484,5	363,2	3496,0	308,7	5,6
16,35	3991,40	4324,96	336,19	4486,8	363,4	3496,0	309,0	5,6
16,37	3991,96	4324,98	336,31	4485,6	363,9	3498,3	308,7	5,6
16,38	3991,96	4325,00	336,31	4485,6	363,7	3498,3	309,0	5,6
16,40	3994,27	4325,01	336,65	4489,1	363,9	3499,4	309,4	5,6
16,42	3993,11	4325,03	336,19	4486,8	363,7	3499,4	308,7	5,6
16,43	3991,39	4325,05	336,31	4485,6	363,7	3497,2	309,0	5,6
16,45	3992,54	4325,07	335,96	4486,8	363,2	3498,3	308,7	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
16,47	3991,39	4325,09	335,96	4485,6	363,2	3497,2	308,7	5,6
16,48	3989,67	4325,10	336,08	4485,6	363,7	3493,7	308,5	5,6
16,50	3991,96	4325,12	336,42	4485,6	363,7	3498,3	309,2	5,6
16,52	3992,54	4325,14	336,08	4486,8	363,4	3498,3	308,7	5,6
16,53	3993,11	4325,16	336,42	4486,8	363,9	3499,4	309,0	5,6
16,55	3993,11	4325,17	336,65	4486,8	363,9	3499,4	309,4	5,6
16,57	3991,98	4325,19	336,31	4487,9	363,0	3496,0	309,6	5,6
16,58	3993,11	4325,21	336,31	4486,8	363,4	3499,4	309,2	5,6
16,60	3991,38	4325,23	335,96	4484,5	363,2	3498,3	308,7	5,6
16,62	3991,39	4325,24	336,31	4485,6	363,7	3497,2	309,0	5,6
16,63	3991,97	4325,26	335,85	4486,8	363,0	3497,2	308,7	5,6
16,65	3990,81	4325,28	336,08	4484,5	363,2	3497,2	309,0	5,6
16,67	3991,39	4325,29	335,85	4485,6	363,2	3497,2	308,5	5,6
16,68	3994,27	4325,31	336,31	4489,1	363,2	3499,4	309,4	5,6
16,70	3994,26	4325,33	336,08	4487,9	363,4	3500,6	308,7	5,6
16,72	3992,55	4325,35	336,31	4487,9	363,4	3497,2	309,2	5,6
16,73	3993,12	4325,36	335,85	4487,9	363,0	3498,3	308,7	5,6
16,75	3991,96	4325,38	335,96	4485,6	362,7	3498,3	309,2	5,6
16,77	3991,96	4325,40	335,85	4485,6	363,0	3498,3	308,7	5,6
16,78	3991,97	4325,41	335,96	4486,8	363,0	3497,2	309,0	5,6
16,80	3991,38	4325,43	335,96	4484,5	363,0	3498,3	309,0	5,6
16,82	3990,82	4325,45	336,31	4485,6	363,4	3496,0	309,2	5,6
16,83	3992,55	4325,46	336,08	4487,9	363,0	3497,2	309,2	5,6
16,85	3993,12	4325,48	336,08	4487,9	363,0	3498,3	309,2	5,6
16,87	3993,11	4325,49	336,31	4486,8	363,2	3499,4	309,4	5,6
16,88	3993,11	4325,51	336,19	4486,8	363,7	3499,4	308,7	5,6
16,90	3992,54	4325,53	336,19	4486,8	363,0	3498,3	309,4	5,6
16,92	3991,96	4325,54	336,08	4485,6	363,4	3498,3	308,7	5,6
16,93	3991,97	4325,56	336,19	4486,8	363,2	3497,2	309,2	5,6
16,95	3989,66	4325,58	335,85	4483,3	363,0	3496,0	308,7	5,6
16,97	3989,66	4325,59	335,85	4483,3	363,0	3496,0	308,7	5,6
16,98	3992,54	4325,61	336,19	4486,8	363,4	3498,3	309,0	5,6
17,00	3990,81	4325,62	336,08	4484,5	363,0	3497,2	309,2	5,6
17,02	3992,54	4325,64	335,74	4486,8	362,7	3498,3	308,7	5,6
17,03	3994,84	4325,65	336,31	4489,1	363,2	3500,6	309,4	5,6
17,05	3992,54	4325,67	336,19	4486,8	363,2	3498,3	309,2	5,6
17,07	3994,83	4325,69	336,19	4487,9	363,2	3501,7	309,2	5,6
17,08	3991,96	4325,70	335,62	4485,6	362,5	3498,3	308,7	5,6
17,10	3992,54	4325,72	335,74	4486,8	362,7	3498,3	308,7	5,6
17,12	3990,81	4325,73	335,73	4484,5	362,5	3497,2	309,0	5,6
17,13	3991,97	4325,75	335,96	4486,8	363,0	3497,2	309,0	5,6
17,15	3991,96	4325,76	335,85	4485,6	362,7	3498,3	309,0	5,6
17,17	3991,38	4325,78	336,08	4484,5	363,0	3498,3	309,2	5,6
17,18	3992,54	4325,79	336,19	4486,8	363,2	3498,3	309,2	5,6
17,20	3994,27	4325,81	335,96	4489,1	362,7	3499,4	309,2	5,6
17,22	3991,96	4325,82	336,08	4485,6	363,0	3498,3	309,2	5,6
17,23	3993,69	4325,84	335,96	4487,9	362,7	3499,4	309,2	5,6
17,25	3993,11	4325,85	335,96	4486,8	363,0	3499,4	309,0	5,6
17,27	3991,39	4325,87	335,85	4485,6	362,7	3497,2	309,0	5,6
17,28	3990,82	4325,88	335,74	4485,6	362,7	3496,0	308,7	5,6
17,30	3991,38	4325,90	335,62	4484,5	362,5	3498,3	308,7	5,6
17,32	3991,38	4325,91	335,74	4484,5	362,7	3498,3	308,7	5,6
17,33	3993,68	4325,93	335,96	4486,8	363,2	3500,6	308,7	5,6
17,35	3993,11	4325,94	336,31	4486,8	363,4	3499,4	309,2	5,6
17,37	3993,69	4325,96	336,08	4487,9	363,0	3499,4	309,2	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
17,38	3993,11	4325,97	335,85	4486,8	362,7	3499,4	309,0	5,6
17,40	3993,11	4325,99	335,62	4486,8	362,5	3499,4	308,7	5,6
17,42	3991,96	4326,00	335,96	4485,6	362,7	3498,3	309,2	5,6
17,43	3990,80	4326,02	335,39	4483,3	361,8	3498,3	309,0	5,6
17,45	3991,39	4326,03	335,39	4485,6	362,1	3497,2	308,7	5,6
17,47	3991,95	4326,04	336,08	4484,5	363,0	3499,4	309,2	5,6
17,48	3990,22	4326,06	335,39	4482,1	362,1	3498,3	308,7	5,6
17,50	3992,54	4326,07	335,39	4486,8	362,1	3498,3	308,7	5,6
17,52	3993,68	4326,09	336,08	4486,8	363,0	3500,6	309,2	5,6
17,53	3993,11	4326,10	336,19	4486,8	363,2	3499,4	309,2	5,6
17,55	3992,55	4326,11	335,73	4487,9	362,3	3497,2	309,2	5,6
17,57	3992,54	4326,13	336,08	4486,8	362,7	3498,3	309,4	5,6
17,58	3991,39	4326,14	335,73	4485,6	362,3	3497,2	309,2	5,6
17,60	3991,95	4326,16	335,51	4484,5	362,1	3499,4	309,0	5,6
17,62	3991,39	4326,17	335,51	4485,6	362,1	3497,2	309,0	5,6
17,63	3991,95	4326,18	335,28	4484,5	361,8	3499,4	308,7	5,6
17,65	3991,96	4326,20	335,28	4485,6	361,8	3498,3	308,7	5,6
17,67	3993,10	4326,21	335,85	4485,6	362,5	3500,6	309,2	5,6
17,68	3993,11	4326,23	335,73	4486,8	362,3	3499,4	309,2	5,6
17,70	3992,54	4326,24	335,51	4486,8	362,1	3498,3	309,0	5,6
17,72	3991,95	4326,25	335,73	4484,5	362,3	3499,4	309,2	5,6
17,73	3992,54	4326,27	335,28	4486,8	361,6	3498,3	309,0	5,6
17,75	3991,95	4326,28	335,28	4484,5	362,1	3499,4	308,5	5,6
17,77	3991,39	4326,29	335,62	4485,6	362,3	3497,2	309,0	5,6
17,78	3991,38	4326,31	335,39	4484,5	361,8	3498,3	309,0	5,6
17,80	3991,39	4326,32	335,39	4485,6	361,8	3497,2	309,0	5,6
17,82	3992,54	4326,33	335,85	4486,8	362,5	3498,3	309,2	5,6
17,83	3991,40	4326,35	336,19	4486,8	362,7	3496,0	309,6	5,6
17,85	3993,11	4326,36	335,73	4486,8	362,3	3499,4	309,2	5,6
17,87	3991,39	4326,37	335,62	4485,6	362,1	3497,2	309,2	5,6
17,88	3991,39	4326,39	335,50	4485,6	361,8	3497,2	309,2	5,6
17,90	3991,95	4326,40	335,28	4484,5	361,8	3499,4	308,7	5,6
17,92	3991,95	4326,41	335,62	4484,5	362,1	3499,4	309,2	5,6
17,93	3991,38	4326,43	335,51	4484,5	362,1	3498,3	309,0	5,6
17,95	3991,96	4326,44	335,50	4485,6	361,8	3498,3	309,2	5,6
17,97	3992,54	4326,45	335,96	4486,8	362,7	3498,3	309,2	5,6
17,98	3993,69	4326,46	335,62	4487,9	362,1	3499,4	309,2	5,6
18,00	3993,11	4326,48	335,85	4486,8	362,3	3499,4	309,4	5,6
18,02	3993,68	4326,49	335,62	4486,8	361,8	3500,6	309,4	5,6
18,03	3993,11	4326,50	335,28	4486,8	361,8	3499,4	308,7	5,6
18,05	3993,09	4326,52	335,73	4484,5	362,1	3501,7	309,4	5,6
18,07	3992,54	4326,53	335,51	4486,8	362,1	3498,3	309,0	5,6
18,08	3993,11	4326,54	335,16	4486,8	361,6	3499,4	308,7	5,6
18,10	3991,94	4326,55	335,50	4483,3	361,8	3500,6	309,2	5,6
18,12	3990,80	4326,57	335,39	4483,3	361,6	3498,3	309,2	5,6
18,13	3993,68	4326,58	335,73	4486,8	362,1	3500,6	309,4	5,6
18,15	3993,11	4326,59	335,73	4486,8	362,3	3499,4	309,2	5,6
18,17	3992,54	4326,60	335,51	4486,8	362,1	3498,3	309,0	5,6
18,18	3993,68	4326,61	335,50	4486,8	361,6	3500,6	309,4	5,6
18,20	3993,11	4326,63	335,28	4486,8	361,4	3499,4	309,2	5,6
18,22	3990,79	4326,64	335,28	4482,1	361,4	3499,4	309,2	5,6
18,23	3990,22	4326,65	335,28	4482,1	361,8	3498,3	308,7	5,6
18,25	3991,38	4326,66	334,93	4484,5	361,1	3498,3	308,7	5,6
18,27	3993,09	4326,68	335,62	4484,5	362,1	3501,7	309,2	5,6
18,28	3994,26	4326,69	335,50	4487,9	361,6	3500,6	309,4	5,6

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
18,30	3992,54	4326,70	335,62	4486,8	361,8	3498,3	309,4	5,6
18,32	3973,56	4326,71	332,06	4470,5	357,0	3476,6	307,1	5,6
18,33	748,10	155,67	-25,21	864,4	-85,2	631,8	34,8	0,6
18,35	434,48	155,67	-22,00	490,8	-84,8	378,2	40,8	0,1
18,37	330,69	155,67	-16,72	365,5	-78,3	295,9	44,9	-0,1
18,38	279,36	155,67	-14,43	300,5	-74,7	258,2	45,8	-0,2
18,40	248,79	155,67	-13,74	262,2	-71,7	235,4	44,2	-0,2
18,42	232,06	155,67	-13,62	241,3	-69,4	222,8	42,1	-0,2
18,43	218,23	155,67	-13,96	226,3	-67,8	210,2	39,9	-0,2
18,45	210,14	155,67	-14,76	213,5	-66,6	206,8	37,1	-0,2
18,47	202,66	155,67	-15,79	206,5	-65,7	198,8	34,1	-0,3
18,48	196,31	155,68	-16,59	198,4	-64,6	194,2	31,4	-0,3
18,50	189,98	155,68	-17,39	191,4	-63,6	188,5	28,9	-0,3
18,52	185,37	155,68	-18,07	186,8	-62,9	183,9	26,8	-0,3
18,53	181,35	155,68	-18,53	183,3	-62,0	179,4	25,0	-0,3
18,55	179,03	155,68	-18,53	179,8	-60,9	178,2	23,8	-0,3
18,57	177,89	155,68	-18,64	179,8	-59,7	175,9	22,4	-0,3
18,58	176,16	155,68	-18,53	177,5	-58,4	174,8	21,3	-0,3
18,60	173,87	155,68	-18,75	176,4	-57,7	171,4	20,2	-0,3
18,62	172,12	155,68	-19,21	171,7	-57,2	172,5	18,8	-0,3
18,63	169,83	155,68	-19,09	171,7	-56,1	167,9	17,9	-0,3
18,65	166,95	155,68	-19,78	168,2	-56,1	165,7	16,5	-0,3
18,67	165,81	155,68	-19,32	168,2	-55,1	163,4	16,5	-0,3
18,68	165,24	155,68	-18,86	168,2	-53,8	162,2	16,0	-0,3
18,70	163,50	155,68	-18,40	164,8	-52,8	162,2	16,0	-0,3
18,72	162,34	155,68	-18,40	163,6	-52,1	161,1	15,3	-0,3
18,73	161,20	155,68	-18,06	163,6	-51,2	158,8	15,1	-0,3
18,75	160,62	155,68	-17,83	162,4	-50,8	158,8	15,1	-0,3
18,77	158,88	155,68	-18,06	159,0	-50,5	158,8	14,4	-0,3
18,78	158,31	155,68	-17,83	159,0	-49,6	157,7	14,0	-0,3
18,80	156,02	155,68	-17,60	157,8	-49,2	154,2	14,0	-0,3
18,82	155,43	155,68	-17,14	155,5	-48,0	155,4	13,7	-0,3
18,83	156,01	155,68	-16,91	156,6	-47,3	155,4	13,5	-0,3
18,85	156,01	155,68	-16,68	156,6	-46,9	155,4	13,5	-0,3
18,87	154,86	155,68	-16,45	155,5	-46,2	154,2	13,3	-0,3
18,88	153,71	155,68	-16,10	155,5	-45,5	151,9	13,3	-0,3
18,90	151,98	155,68	-16,10	153,2	-45,5	150,8	13,3	-0,3
18,92	150,24	155,68	-15,64	149,7	-44,8	150,8	13,5	-0,3
18,93	151,39	155,68	-15,64	150,8	-44,1	151,9	12,8	-0,3
18,95	150,82	155,68	-15,30	150,8	-43,9	150,8	13,3	-0,3
18,97	149,67	155,68	-14,72	149,7	-43,0	149,7	13,5	-0,3
18,98	150,81	155,68	-14,61	149,7	-42,7	151,9	13,5	-0,3
19,00	150,26	155,68	-13,92	152,0	-41,8	148,5	14,0	-0,3
19,02	149,66	155,69	-13,92	148,5	-41,6	150,8	13,7	-0,3
19,03	148,53	155,69	-13,46	149,7	-41,1	147,4	14,2	-0,3
19,05	146,21	155,69	-13,46	145,0	-40,9	147,4	14,0	-0,3
19,07	146,22	155,69	-13,46	146,2	-40,4	146,2	13,5	-0,3
19,08	146,22	155,69	-13,46	146,2	-40,7	146,2	13,7	-0,3
19,10	145,64	155,69	-12,66	145,0	-39,7	146,2	14,4	-0,3
19,12	146,21	155,69	-12,66	145,0	-39,5	147,4	14,2	-0,3
19,13	145,64	155,69	-12,08	145,0	-38,8	146,2	14,7	-0,3
19,15	146,80	155,69	-12,08	147,4	-38,6	146,2	14,4	-0,3
19,17	142,75	155,69	-11,74	141,6	-38,1	144,0	14,7	-0,3
19,18	142,75	155,69	-11,62	141,6	-37,7	144,0	14,4	-0,3
19,20	142,75	155,69	-11,39	141,6	-37,4	144,0	14,7	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
19,22	141,60	155,69	-11,51	140,4	-37,2	142,8	14,2	-0,3
19,23	141,59	155,69	-10,71	139,2	-36,8	144,0	15,3	-0,3
19,25	140,44	155,69	-10,82	138,1	-36,5	142,8	14,9	-0,3
19,27	142,74	155,69	-10,48	140,4	-36,1	145,1	15,1	-0,3
19,28	141,01	155,69	-10,13	138,1	-35,4	144,0	15,1	-0,3
19,30	141,59	155,69	-10,02	139,2	-35,6	144,0	15,6	-0,3
19,32	141,60	155,69	-9,90	140,4	-35,4	142,8	15,6	-0,3
19,33	138,73	155,69	-9,56	138,1	-34,9	139,4	15,8	-0,3
19,35	138,15	155,69	-10,13	136,9	-35,8	139,4	15,6	-0,3
19,37	138,14	155,69	-8,98	135,8	-34,2	140,5	16,3	-0,3
19,38	136,98	155,69	-9,10	133,4	-34,0	140,5	15,8	-0,3
19,40	137,57	155,69	-8,87	135,8	-33,8	139,4	16,0	-0,3
19,42	141,01	155,69	-8,41	138,1	-33,3	144,0	16,5	-0,3
19,43	138,14	155,69	-8,52	135,8	-33,5	140,5	16,5	-0,3
19,45	135,84	155,69	-8,64	133,4	-33,5	138,2	16,3	-0,3
19,47	136,99	155,69	-8,30	134,6	-33,1	139,4	16,5	-0,3
19,48	136,42	155,69	-8,30	135,8	-33,1	137,1	16,5	-0,3
19,50	135,83	155,69	-8,07	132,3	-32,6	139,4	16,5	-0,3
19,52	136,41	155,69	-7,84	133,4	-32,2	139,4	16,5	-0,3
19,53	135,83	155,69	-7,49	132,3	-31,7	139,4	16,7	-0,3
19,55	136,41	155,69	-7,61	133,4	-31,7	139,4	16,5	-0,3
19,57	137,00	155,69	-7,15	135,8	-31,2	138,2	16,9	-0,3
19,58	133,53	155,69	-7,15	131,1	-31,0	136,0	16,7	-0,3
19,60	134,68	155,69	-7,26	132,3	-31,2	137,1	16,7	-0,3
19,62	134,68	155,69	-7,38	131,1	-31,2	138,2	16,5	-0,3
19,63	134,68	155,70	-6,80	131,1	-30,6	138,2	16,9	-0,3
19,65	132,38	155,70	-6,80	130,0	-30,8	134,8	17,2	-0,3
19,67	135,26	155,70	-6,34	133,4	-30,1	137,1	17,4	-0,3
19,68	134,10	155,70	-6,11	131,1	-29,9	137,1	17,6	-0,3
19,70	132,37	155,70	-6,00	128,8	-29,9	136,0	17,9	-0,3
19,72	131,22	155,70	-6,00	127,6	-29,9	134,8	17,9	-0,3
19,73	130,08	155,70	-6,00	127,6	-29,4	132,5	17,4	-0,3
19,75	130,07	155,70	-6,00	126,5	-29,4	133,7	17,4	-0,3
19,77	130,06	155,70	-5,77	125,3	-29,2	134,8	17,6	-0,3
19,78	128,92	155,70	-6,00	125,3	-29,4	132,5	17,4	-0,3
19,80	131,79	155,70	-5,08	127,6	-28,5	136,0	18,3	-0,3
19,82	130,64	155,70	-4,97	126,5	-28,5	134,8	18,6	-0,3
19,83	130,07	155,70	-5,43	126,5	-28,5	133,7	17,6	-0,3
19,85	130,08	155,70	-5,08	127,6	-28,5	132,5	18,3	-0,3
19,87	128,34	155,70	-4,97	124,1	-28,7	132,5	18,8	-0,3
19,88	128,33	155,70	-4,97	123,0	-28,0	133,7	18,1	-0,3
19,90	127,19	155,70	-5,20	123,0	-28,5	131,4	18,1	-0,3
19,92	126,62	155,70	-4,85	123,0	-27,8	130,2	18,1	-0,3
19,93	128,34	155,70	-4,62	124,1	-28,0	132,5	18,8	-0,3
19,95	128,34	155,70	-4,51	124,1	-27,6	132,5	18,6	-0,3
19,97	128,34	155,70	-4,28	124,1	-27,3	132,5	18,8	-0,3
19,98	126,03	155,70	-4,28	120,7	-27,3	131,4	18,8	-0,3
20,00	127,20	155,70	-4,28	125,3	-27,3	129,1	18,8	-0,3
20,02	125,45	155,70	-4,28	119,5	-27,1	131,4	18,6	-0,3
20,03	123,74	155,70	-4,16	120,7	-27,1	126,8	18,8	-0,3
20,05	124,89	155,70	-4,28	121,8	-26,9	128,0	18,3	-0,3
20,07	125,46	155,70	-3,82	120,7	-26,6	130,2	19,0	-0,3
20,08	127,76	155,70	-3,59	123,0	-26,2	132,5	19,0	-0,3
20,10	126,04	155,70	-3,59	121,8	-26,4	130,2	19,2	-0,3
20,12	124,31	155,70	-3,70	120,7	-26,4	128,0	19,0	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
20,13	123,15	155,70	-3,47	118,3	-26,0	128,0	19,0	-0,3
20,15	124,30	155,70	-3,36	119,5	-25,7	129,1	19,0	-0,3
20,17	124,32	155,70	-3,25	121,8	-25,7	126,8	19,2	-0,3
20,18	124,30	155,70	-3,13	119,5	-25,5	129,1	19,2	-0,3
20,20	126,04	155,70	-2,67	121,8	-25,3	130,2	19,9	-0,3
20,22	123,73	155,70	-2,90	119,5	-25,5	128,0	19,7	-0,3
20,23	122,02	155,70	-3,13	119,5	-25,3	124,5	19,0	-0,3
20,25	122,01	155,70	-2,79	118,3	-24,8	125,7	19,2	-0,3
20,27	120,86	155,70	-3,47	117,2	-26,0	124,5	19,0	-0,3
20,28	121,43	155,70	-2,90	117,2	-25,3	125,7	19,5	-0,3
20,30	120,86	155,70	-2,67	117,2	-24,8	124,5	19,5	-0,3
20,32	123,17	155,70	-2,33	120,7	-24,6	125,7	19,9	-0,3
20,33	121,43	155,70	-2,44	117,2	-24,6	125,7	19,7	-0,3
20,35	122,02	155,70	-2,56	119,5	-24,8	124,5	19,7	-0,3
20,37	121,44	155,71	-2,79	118,3	-25,3	124,5	19,7	-0,3
20,38	120,85	155,71	-2,44	116,0	-24,6	125,7	19,7	-0,3
20,40	120,29	155,71	-2,67	117,2	-24,6	123,4	19,2	-0,3
20,42	120,86	155,71	-2,33	117,2	-24,4	124,5	19,7	-0,3
20,43	119,71	155,71	-2,33	116,0	-24,1	123,4	19,5	-0,3
20,45	120,87	155,71	-1,98	118,3	-23,9	123,4	19,9	-0,3
20,47	119,71	155,71	-2,10	116,0	-23,9	123,4	19,7	-0,3
20,48	120,28	155,71	-1,98	116,0	-23,9	124,5	19,9	-0,3
20,50	119,13	155,71	-2,10	114,9	-23,7	123,4	19,5	-0,3
20,52	118,56	155,71	-2,33	114,9	-23,9	122,2	19,2	-0,3
20,53	119,71	155,71	-2,33	116,0	-23,9	123,4	19,2	-0,3
20,55	117,98	155,71	-1,98	114,9	-23,4	121,1	19,5	-0,3
20,57	117,98	155,71	-1,52	114,9	-23,2	121,1	20,2	-0,3
20,58	119,71	155,71	-1,29	116,0	-22,7	123,4	20,2	-0,3
20,60	119,71	155,71	-1,06	116,0	-22,3	123,4	20,2	-0,3
20,62	117,98	155,71	-1,64	114,9	-23,2	121,1	19,9	-0,3
20,63	117,98	155,71	-1,29	114,9	-23,0	121,1	20,4	-0,3
20,65	116,82	155,71	-2,10	112,5	-23,9	121,1	19,7	-0,3
20,67	117,98	155,71	-1,87	113,7	-23,0	122,2	19,2	-0,3
20,68	115,66	155,71	-1,52	110,2	-23,0	121,1	19,9	-0,3
20,70	118,56	155,71	-1,41	114,9	-22,5	122,2	19,7	-0,3
20,72	74,46	155,71	-5,65	100,9	-25,0	48,0	13,7	-0,3
20,73	76,75	155,71	-6,91	100,9	-27,3	52,6	13,5	-0,3
20,75	78,48	155,71	-6,80	103,3	-27,3	53,7	13,7	-0,3
20,77	77,32	155,71	-6,80	100,9	-27,6	53,7	14,0	-0,3
20,78	77,89	155,71	-6,91	100,9	-27,6	54,8	13,7	-0,3
20,80	77,89	155,71	-6,45	100,9	-26,9	54,8	14,0	-0,3
20,82	80,76	155,71	-6,57	103,3	-27,3	58,3	14,2	-0,3
20,83	79,04	155,71	-6,34	102,1	-26,4	56,0	13,7	-0,3
20,85	78,47	155,71	-6,34	102,1	-26,6	54,8	14,0	-0,3
20,87	79,04	155,71	-6,57	102,1	-26,6	56,0	13,5	-0,3
20,88	80,18	155,71	-6,22	102,1	-26,2	58,3	13,7	-0,3
20,90	78,46	155,71	-7,03	100,9	-27,1	56,0	13,1	-0,3
20,92	77,89	155,71	-6,45	100,9	-26,6	54,8	13,7	-0,3
20,93	79,60	155,71	-6,45	100,9	-26,6	58,3	13,7	-0,3
20,95	81,33	155,71	-5,99	102,1	-26,0	60,6	14,0	-0,3
20,97	79,60	155,71	-5,88	100,9	-26,0	58,3	14,2	-0,3
20,98	79,60	155,71	-6,45	99,8	-26,4	59,4	13,5	-0,3
21,00	77,30	155,71	-6,91	98,6	-26,6	56,0	12,8	-0,3
21,02	77,30	155,71	-6,11	98,6	-26,2	56,0	14,0	-0,3
21,03	76,71	155,71	-6,11	96,3	-25,7	57,1	13,5	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
21,05	79,60	155,71	-5,88	99,8	-26,0	59,4	14,2	-0,3
21,07	79,60	155,71	-5,88	100,9	-25,7	58,3	14,0	-0,3
21,08	80,75	155,71	-6,11	100,9	-26,0	60,6	13,7	-0,3
21,10	78,45	155,71	-5,65	99,8	-25,5	57,1	14,2	-0,3
21,12	76,73	155,71	-6,11	98,6	-25,7	54,8	13,5	-0,3
21,13	76,15	155,71	-6,45	97,5	-25,7	54,8	12,8	-0,3
21,15	78,45	155,71	-5,88	99,8	-25,5	57,1	13,7	-0,3
21,17	79,60	155,71	-5,53	100,9	-25,3	58,3	14,2	-0,3
21,18	79,02	155,71	-5,31	98,6	-24,8	59,4	14,2	-0,3
21,20	79,02	155,71	-5,65	99,8	-25,3	58,3	14,0	-0,3
21,22	77,87	155,71	-5,65	98,6	-25,3	57,1	14,0	-0,3
21,23	77,88	155,71	-5,31	99,8	-24,8	56,0	14,2	-0,3
21,25	76,15	155,71	-5,53	97,5	-24,8	54,8	13,7	-0,3
21,27	77,87	155,72	-5,31	98,6	-24,8	57,1	14,2	-0,3
21,28	77,31	155,72	-5,42	99,8	-24,6	54,8	13,7	-0,3
21,30	78,44	155,72	-5,08	97,5	-24,4	59,4	14,2	-0,3
21,32	78,44	155,72	-5,19	97,5	-24,6	59,4	14,2	-0,3
21,33	78,44	155,72	-5,53	97,5	-24,8	59,4	13,7	-0,3
21,35	75,57	155,72	-5,42	96,3	-24,8	54,8	14,0	-0,3
21,37	77,29	155,72	-5,42	97,5	-24,8	57,1	14,0	-0,3
21,38	77,87	155,72	-5,53	98,6	-24,8	57,1	13,7	-0,3
21,40	78,44	155,72	-5,19	98,6	-24,4	58,3	14,0	-0,3
21,42	80,75	155,72	-5,08	100,9	-24,4	60,6	14,2	-0,3
21,43	79,60	155,72	-5,19	99,8	-24,6	59,4	14,2	-0,3
21,45	79,02	155,72	-4,96	98,6	-24,1	59,4	14,2	-0,3
21,47	77,86	155,72	-5,08	97,5	-24,4	58,3	14,2	-0,3
21,48	77,86	155,72	-4,96	96,3	-24,1	59,4	14,2	-0,3
21,50	78,44	155,72	-5,19	97,5	-24,6	59,4	14,2	-0,3
21,52	79,59	155,72	-4,73	98,6	-23,9	60,6	14,4	-0,3
21,53	79,02	155,72	-4,50	98,6	-23,7	59,4	14,7	-0,3
21,55	77,86	155,72	-4,96	96,3	-23,9	59,4	14,0	-0,3
21,57	76,13	155,72	-4,85	95,1	-23,9	57,1	14,2	-0,3
21,58	76,69	155,72	-4,85	94,0	-23,9	59,4	14,2	-0,3
21,60	76,71	155,72	-4,27	96,3	-23,0	57,1	14,4	-0,3
21,62	76,71	155,72	-4,96	96,3	-24,4	57,1	14,4	-0,3
21,63	77,86	155,72	-5,07	96,3	-23,9	59,4	13,7	-0,3
21,65	76,14	155,72	-4,96	96,3	-23,9	56,0	14,0	-0,3
21,67	76,13	155,72	-4,50	95,1	-23,2	57,1	14,2	-0,3
21,68	76,70	155,72	-4,96	95,1	-23,9	58,3	14,0	-0,3
21,70	76,70	155,72	-4,50	95,1	-23,2	58,3	14,2	-0,3
21,72	77,28	155,72	-4,62	96,3	-23,7	58,3	14,4	-0,3
21,73	78,44	155,72	-4,39	97,5	-23,4	59,4	14,7	-0,3
21,75	78,43	155,72	-4,27	96,3	-23,2	60,6	14,7	-0,3
21,77	77,86	155,72	-4,50	96,3	-23,2	59,4	14,2	-0,3
21,78	77,27	155,72	-4,62	94,0	-23,4	60,6	14,2	-0,3
21,80	77,27	155,72	-4,73	94,0	-23,2	60,6	13,7	-0,3
21,82	76,69	155,72	-4,62	94,0	-23,2	59,4	14,0	-0,3
21,83	74,97	155,72	-4,27	92,8	-22,7	57,1	14,2	-0,3
21,85	78,43	155,72	-4,27	96,3	-23,0	60,6	14,4	-0,3
21,87	78,43	155,72	-4,16	96,3	-22,7	60,6	14,4	-0,3
21,88	76,69	155,72	-4,27	94,0	-22,7	59,4	14,2	-0,3
21,90	74,97	155,72	-4,39	92,8	-23,0	57,1	14,2	-0,3
21,92	75,53	155,72	-4,73	91,7	-23,4	59,4	14,0	-0,3
21,93	76,12	155,72	-4,50	94,0	-23,2	58,3	14,2	-0,3
21,95	76,69	155,72	-4,16	94,0	-22,5	59,4	14,2	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
21,97	76,69	155,72	-4,27	94,0	-23,0	59,4	14,4	-0,3
21,98	76,69	155,72	-4,04	94,0	-22,3	59,4	14,2	-0,3
22,00	75,55	155,72	-4,16	94,0	-22,5	57,1	14,2	-0,3
22,02	72,09	155,72	-4,39	89,3	-23,0	54,8	14,2	-0,3
22,03	75,55	155,72	-4,16	94,0	-22,7	57,1	14,4	-0,3
22,05	76,70	155,72	-4,04	95,1	-22,3	58,3	14,2	-0,3
22,07	77,28	155,72	-4,27	96,3	-22,7	58,3	14,2	-0,3
22,08	76,11	155,72	-3,81	91,7	-22,1	60,6	14,4	-0,3
22,10	77,28	155,72	-3,81	95,1	-22,1	59,4	14,4	-0,3
22,12	77,28	155,72	-3,81	95,1	-21,8	59,4	14,2	-0,3
22,13	76,69	155,72	-4,27	94,0	-22,5	59,4	14,0	-0,3
22,15	76,11	155,72	-4,27	92,8	-22,5	59,4	14,0	-0,3
22,17	73,23	155,72	-4,04	89,3	-22,3	57,1	14,2	-0,3
22,18	77,27	155,72	-4,16	94,0	-22,1	60,6	13,7	-0,3
22,20	73,23	155,72	-3,93	89,3	-22,1	57,1	14,2	-0,3
22,22	76,13	155,72	-3,93	95,1	-22,1	57,1	14,2	-0,3
22,23	72,09	155,72	-4,16	89,3	-22,5	54,8	14,2	-0,3
22,25	72,09	155,72	-4,39	89,3	-22,5	54,8	13,7	-0,3
22,27	73,24	155,72	-4,16	90,5	-22,3	56,0	14,0	-0,3
22,28	73,25	155,72	-3,93	91,7	-22,1	54,8	14,2	-0,3
22,30	74,37	155,72	-3,70	89,3	-21,8	59,4	14,4	-0,3
22,32	74,97	155,72	-3,81	92,8	-21,6	57,1	14,0	-0,3
22,33	77,28	155,72	-3,93	95,1	-22,1	59,4	14,2	-0,3
22,35	73,23	155,72	-4,16	89,3	-22,1	57,1	13,7	-0,3
22,37	74,95	155,72	-3,93	89,3	-22,1	60,6	14,2	-0,3
22,38	73,23	155,72	-4,04	89,3	-22,3	57,1	14,2	-0,3
22,40	75,53	155,72	-3,58	91,7	-21,8	59,4	14,7	-0,3
22,42	74,37	155,72	-3,58	89,3	-21,8	59,4	14,7	-0,3
22,43	73,80	155,73	-3,58	89,3	-21,6	58,3	14,4	-0,3
22,45	74,40	155,73	-3,81	92,8	-22,1	56,0	14,4	-0,3
22,47	73,24	155,73	-3,81	90,5	-21,8	56,0	14,2	-0,3
22,48	75,53	155,73	-3,47	91,7	-21,6	59,4	14,7	-0,3
22,50	74,37	155,73	-3,58	88,2	-21,6	60,6	14,4	-0,3
22,52	72,66	155,73	-3,58	89,3	-21,6	56,0	14,4	-0,3
22,53	70,93	155,73	-3,93	87,0	-22,1	54,8	14,2	-0,3
22,55	72,65	155,73	-3,35	88,2	-21,4	57,1	14,7	-0,3
22,57	74,95	155,73	-3,47	90,5	-21,4	59,4	14,4	-0,3
22,58	75,53	155,73	-3,70	90,5	-21,8	60,6	14,4	-0,3
22,60	74,37	155,73	-3,70	89,3	-21,6	59,4	14,2	-0,3
22,62	72,65	155,73	-3,70	88,2	-21,6	57,1	14,2	-0,3
22,63	72,65	155,73	-3,70	88,2	-22,1	57,1	14,7	-0,3
22,65	70,93	155,73	-3,58	87,0	-21,8	54,8	14,7	-0,3
22,67	74,37	155,73	-3,58	88,2	-21,6	60,6	14,4	-0,3
22,68	74,95	155,73	-3,24	89,3	-21,1	60,6	14,7	-0,3
22,70	74,37	155,73	-3,58	89,3	-21,6	59,4	14,4	-0,3
22,72	72,07	155,73	-3,70	87,0	-21,6	57,1	14,2	-0,3
22,73	74,38	155,73	-3,58	90,5	-21,4	58,3	14,2	-0,3
22,75	74,37	155,73	-3,58	89,3	-21,6	59,4	14,4	-0,3
22,77	74,37	155,73	-3,24	89,3	-21,4	59,4	14,9	-0,3
22,78	73,80	155,73	-3,12	89,3	-20,9	58,3	14,7	-0,3
22,80	72,63	155,73	-3,58	85,9	-21,6	59,4	14,4	-0,3
22,82	73,21	155,73	-3,24	87,0	-21,1	59,4	14,7	-0,3
22,83	74,37	155,73	-3,24	88,2	-21,1	60,6	14,7	-0,3
22,85	73,22	155,73	-3,35	88,2	-20,9	58,3	14,2	-0,3
22,87	74,37	155,73	-3,35	89,3	-21,1	59,4	14,4	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
22,88	73,20	155,73	-3,35	84,7	-21,1	61,7	14,4	-0,3
22,90	71,48	155,73	-3,47	84,7	-21,1	58,3	14,2	-0,3
22,92	71,48	155,73	-3,47	84,7	-21,1	58,3	14,2	-0,3
22,93	70,35	155,73	-3,47	85,9	-21,4	54,8	14,4	-0,3
22,95	73,79	155,73	-3,24	88,2	-21,1	59,4	14,7	-0,3
22,97	74,37	155,73	-3,12	88,2	-21,1	60,6	14,9	-0,3
22,98	73,21	155,73	-3,12	87,0	-20,9	59,4	14,7	-0,3
23,00	73,21	155,73	-3,58	87,0	-21,4	59,4	14,2	-0,3
23,02	70,34	155,73	-3,47	84,7	-21,1	56,0	14,2	-0,3
23,03	72,64	155,73	-3,58	87,0	-21,1	58,3	14,0	-0,3
23,05	72,63	155,73	-2,78	85,9	-20,4	59,4	14,9	-0,3
23,07	74,95	155,73	-2,78	89,3	-20,7	60,6	15,1	-0,3
23,08	73,22	155,73	-3,01	88,2	-21,1	58,3	15,1	-0,3
23,10	73,79	155,73	-3,24	87,0	-20,9	60,6	14,4	-0,3
23,12	72,07	155,73	-2,89	87,0	-20,4	57,1	14,7	-0,3
23,13	72,06	155,73	-3,24	85,9	-20,9	58,3	14,4	-0,3
23,15	72,06	155,73	-2,66	85,9	-20,2	58,3	14,9	-0,3
23,17	73,21	155,73	-2,55	87,0	-20,2	59,4	15,1	-0,3
23,18	71,48	155,73	-3,12	84,7	-20,9	58,3	14,7	-0,3
23,20	71,49	155,73	-3,47	85,9	-21,1	57,1	14,2	-0,3
23,22	70,90	155,73	-3,24	83,5	-20,9	58,3	14,4	-0,3
23,23	70,34	155,73	-3,12	84,7	-20,7	56,0	14,4	-0,3
23,25	73,21	155,73	-2,89	87,0	-20,4	59,4	14,7	-0,3
23,27	72,64	155,73	-3,12	87,0	-20,4	58,3	14,2	-0,3
23,28	71,49	155,73	-3,12	85,9	-20,7	57,1	14,4	-0,3
23,30	70,34	155,73	-3,24	84,7	-20,9	56,0	14,4	-0,3
23,32	70,91	155,73	-3,24	84,7	-20,7	57,1	14,2	-0,3
23,33	68,61	155,73	-3,01	82,4	-20,4	54,8	14,4	-0,3
23,35	72,63	155,73	-2,78	85,9	-20,7	59,4	15,1	-0,3
23,37	72,05	155,73	-2,89	84,7	-20,4	59,4	14,7	-0,3
23,38	72,63	155,73	-2,78	85,9	-20,4	59,4	14,9	-0,3
23,40	70,33	155,73	-3,01	83,5	-20,9	57,1	14,9	-0,3
23,42	69,19	155,73	-3,24	83,5	-20,7	54,8	14,2	-0,3
23,43	71,48	155,73	-2,55	84,7	-20,0	58,3	14,9	-0,3
23,45	73,21	155,73	-2,78	87,0	-20,2	59,4	14,7	-0,3
23,47	72,05	155,73	-2,89	84,7	-20,7	59,4	14,9	-0,3
23,48	70,34	155,73	-3,01	84,7	-20,2	56,0	14,2	-0,3
23,50	69,77	155,73	-2,66	84,7	-20,2	54,8	14,9	-0,3
23,52	70,33	155,73	-2,21	83,5	-19,5	57,1	15,1	-0,3
23,53	72,05	155,73	-2,89	84,7	-20,2	59,4	14,4	-0,3
23,55	69,77	155,73	-2,55	84,7	-20,2	54,8	15,1	-0,3
23,57	69,77	155,73	-3,12	84,7	-20,2	54,8	14,0	-0,3
23,58	71,47	155,73	-2,78	83,5	-20,2	59,4	14,7	-0,3
23,60	72,06	155,73	-2,55	85,9	-20,0	58,3	14,9	-0,3
23,62	72,05	155,73	-2,89	84,7	-20,2	59,4	14,4	-0,3
23,63	71,49	155,73	-3,01	85,9	-20,7	57,1	14,7	-0,3
23,65	69,18	155,73	-3,01	82,4	-20,4	56,0	14,4	-0,3
23,67	70,91	155,73	-2,78	84,7	-20,0	57,1	14,4	-0,3
23,68	70,34	155,73	-2,32	84,7	-19,5	56,0	14,9	-0,3
23,70	72,05	155,73	-1,98	84,7	-19,1	59,4	15,1	-0,3
23,72	72,05	155,73	-2,55	84,7	-19,8	59,4	14,7	-0,3
23,73	68,61	155,73	-2,78	82,4	-20,2	54,8	14,7	-0,3
23,75	69,18	155,73	-2,78	82,4	-20,4	56,0	14,9	-0,3
23,77	68,61	155,73	-2,43	82,4	-19,5	54,8	14,7	-0,3
23,78	71,48	155,73	-2,78	84,7	-20,2	58,3	14,7	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
23,80	72,05	155,73	-1,98	84,7	-19,3	59,4	15,3	-0,3
23,82	70,33	155,73	-2,20	83,5	-19,3	57,1	14,9	-0,3
23,83	69,18	155,73	-2,55	82,4	-19,5	56,0	14,4	-0,3
23,85	69,18	155,73	-2,78	82,4	-20,0	56,0	14,4	-0,3
23,87	70,90	155,73	-2,55	83,5	-20,0	58,3	14,9	-0,3
23,88	70,34	155,73	-2,20	84,7	-19,3	56,0	14,9	-0,3
23,90	70,91	155,73	-2,32	84,7	-19,3	57,1	14,7	-0,3
23,92	70,32	155,73	-2,55	82,4	-19,5	58,3	14,4	-0,3
23,93	69,75	155,73	-2,44	82,4	-20,2	57,1	15,3	-0,3
23,95	68,60	155,73	-2,66	81,2	-20,2	56,0	14,9	-0,3
23,97	68,61	155,73	-2,78	82,4	-19,8	54,8	14,2	-0,3
23,98	70,32	155,73	-2,09	82,4	-19,1	58,3	14,9	-0,3
24,00	68,61	155,73	-2,20	82,4	-19,3	54,8	14,9	-0,3
24,02	69,16	155,73	-2,32	80,1	-19,3	58,3	14,7	-0,3
24,03	68,60	155,73	-2,43	81,2	-19,3	56,0	14,4	-0,3
24,05	68,04	155,73	-2,78	82,4	-20,2	53,7	14,7	-0,3
24,07	70,33	155,73	-2,43	83,5	-19,8	57,1	14,9	-0,3
24,08	70,89	155,73	-2,20	82,4	-19,1	59,4	14,7	-0,3
24,10	68,61	155,73	-1,75	82,4	-18,8	54,8	15,3	-0,3
24,12	70,31	155,74	-2,20	81,2	-19,3	59,4	14,9	-0,3
24,13	67,45	155,74	-2,32	80,1	-19,3	54,8	14,7	-0,3
24,15	68,61	155,74	-2,43	82,4	-19,1	54,8	14,2	-0,3
24,17	70,32	155,74	-1,97	82,4	-18,6	58,3	14,7	-0,3
24,18	68,61	155,74	-1,98	82,4	-18,8	54,8	14,9	-0,3
24,20	68,59	155,74	-2,09	80,1	-19,1	57,1	14,9	-0,3
24,22	68,03	155,74	-2,78	81,2	-19,8	54,8	14,2	-0,3
24,23	68,03	155,74	-2,32	81,2	-19,1	54,8	14,4	-0,3
24,25	70,89	155,74	-2,20	82,4	-18,8	59,4	14,4	-0,3
24,27	70,32	155,74	-2,32	82,4	-18,8	58,3	14,2	-0,3
24,28	68,03	155,74	-2,55	81,2	-19,1	54,8	14,0	-0,3
24,30	66,87	155,74	-2,66	78,9	-19,5	54,8	14,2	-0,3
24,32	68,59	155,74	-2,55	80,1	-19,1	57,1	14,0	-0,3
24,33	69,18	155,74	-1,98	82,4	-18,8	56,0	14,9	-0,3
24,35	70,90	155,74	-2,20	83,5	-18,8	58,3	14,4	-0,3
24,37	70,89	155,74	-2,09	82,4	-18,8	59,4	14,7	-0,3
24,38	68,57	155,74	-2,32	77,7	-19,1	59,4	14,4	-0,3
24,40	68,02	155,74	-2,43	80,1	-19,1	56,0	14,2	-0,3
24,42	69,75	155,74	-2,43	82,4	-19,1	57,1	14,2	-0,3
24,43	68,60	155,74	-2,43	81,2	-19,1	56,0	14,2	-0,3
24,45	67,45	155,74	-2,32	80,1	-18,8	54,8	14,2	-0,3
24,47	70,31	155,74	-2,09	81,2	-18,8	59,4	14,7	-0,3
24,48	69,74	155,74	-2,09	81,2	-18,8	58,3	14,7	-0,3
24,50	68,01	155,74	-2,32	78,9	-18,8	57,1	14,2	-0,3
24,52	66,87	155,74	-2,32	78,9	-18,8	54,8	14,2	-0,3
24,53	68,60	155,74	-2,32	81,2	-19,1	56,0	14,4	-0,3
24,55	68,59	155,74	-2,20	80,1	-18,8	57,1	14,4	-0,3
24,57	70,31	155,74	-1,75	81,2	-18,4	59,4	14,9	-0,3
24,58	70,30	155,74	-2,09	80,1	-18,4	60,6	14,2	-0,3
24,60	67,43	155,74	-2,43	77,7	-19,1	57,1	14,2	-0,3
24,62	66,87	155,74	-2,32	78,9	-19,1	54,8	14,4	-0,3
24,63	67,44	155,74	-1,97	78,9	-18,4	56,0	14,4	-0,3
24,65	67,45	155,74	-1,98	80,1	-18,8	54,8	14,9	-0,3
24,67	69,73	155,74	-1,75	80,1	-18,1	59,4	14,7	-0,3
24,68	68,59	155,74	-1,75	80,1	-18,6	57,1	15,1	-0,3
24,70	70,31	155,74	-1,86	81,2	-18,4	59,4	14,7	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1	Gage1	Gage2	Gage2	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	bar
24,72	69,16	155,74	-2,43	80,1	-18,6	58,3	13,7	-0,3
24,73	68,59	155,74	-1,86	80,1	-18,8	57,1	15,1	-0,3
24,75	68,02	155,74	-1,97	80,1	-18,4	56,0	14,4	-0,3
24,77	68,01	155,74	-2,20	78,9	-18,6	57,1	14,2	-0,3
24,78	68,02	155,74	-2,09	80,1	-18,6	56,0	14,4	-0,3
24,80	68,02	155,74	-2,32	80,1	-18,8	56,0	14,2	-0,3
24,82	68,01	155,74	-1,97	78,9	-18,4	57,1	14,4	-0,3
24,83	67,45	155,74	-1,86	80,1	-18,4	54,8	14,7	-0,3
24,85	69,73	155,74	-1,75	80,1	-18,4	59,4	14,9	-0,3
24,87	69,15	155,74	-1,97	78,9	-18,4	59,4	14,4	-0,3
24,88	70,31	155,74	-1,86	81,2	-18,4	59,4	14,7	-0,3
24,90	68,02	155,74	-1,97	80,1	-18,4	56,0	14,4	-0,3
24,92	66,27	155,74	-2,32	75,4	-18,8	57,1	14,2	-0,3
24,93	65,70	155,74	-2,20	75,4	-18,4	56,0	14,0	-0,3
24,95	69,74	155,74	-2,20	81,2	-18,8	58,3	14,4	-0,3
24,97	69,73	155,74	-2,20	80,1	-19,1	59,4	14,7	-0,3
24,98	69,72	155,74	-2,55	78,9	-18,8	60,6	13,7	-0,3
25,00	68,00	155,74	-1,86	77,7	-18,4	58,3	14,7	-0,3
25,02	69,17	155,74	-1,52	81,2	-18,1	57,1	15,1	-0,3
25,03	70,30	155,74	-1,63	80,1	-18,4	60,6	15,1	-0,3
25,05	69,73	155,74	-1,75	80,1	-18,4	59,4	14,9	-0,3
25,07	68,57	155,74	-1,86	77,7	-18,1	59,4	14,4	-0,3
25,08	67,99	155,74	-1,75	76,6	-18,1	59,4	14,7	-0,3
25,10	67,44	155,74	-1,75	78,9	-18,1	56,0	14,7	-0,3
25,12	69,16	155,74	-1,97	80,1	-18,1	58,3	14,2	-0,3
25,13	65,72	155,74	-1,86	77,7	-18,1	53,7	14,4	-0,3
25,15	66,29	155,74	-2,20	77,7	-18,6	54,8	14,2	-0,3
25,17	67,43	155,74	-2,09	77,7	-18,4	57,1	14,2	-0,3
25,18	67,99	155,74	-1,74	76,6	-17,9	59,4	14,4	-0,3
25,20	69,16	155,74	-1,63	80,1	-17,9	58,3	14,7	-0,3
25,22	67,44	155,74	-1,86	78,9	-18,4	56,0	14,7	-0,3
25,23	68,59	155,74	-1,52	80,1	-17,9	57,1	14,9	-0,3
25,25	67,99	155,74	-1,75	76,6	-18,1	59,4	14,7	-0,3
25,27	69,15	155,74	-1,52	78,9	-18,1	59,4	15,1	-0,3
25,28	69,73	155,74	-1,52	80,1	-17,9	59,4	14,9	-0,3
25,30	69,73	155,74	-1,40	80,1	-17,9	59,4	15,1	-0,3
25,32	68,58	155,74	-1,40	78,9	-17,9	58,3	15,1	-0,3
25,33	68,00	155,74	-1,52	77,7	-17,9	58,3	14,9	-0,3
25,35	67,99	155,74	-1,86	76,6	-18,4	59,4	14,7	-0,3
25,37	68,01	155,74	-1,40	78,9	-17,9	57,1	15,1	-0,3
25,38	68,00	155,74	-1,86	77,7	-17,9	58,3	14,2	-0,3
25,40	65,68	155,74	-1,75	73,1	-18,1	58,3	14,7	-0,3
25,42	65,13	155,74	-1,86	75,4	-18,1	54,8	14,4	-0,3
25,43	66,28	155,74	-1,86	76,6	-18,1	56,0	14,4	-0,3
25,45	65,71	155,74	-1,63	76,6	-17,7	54,8	14,4	-0,3
25,47	66,27	155,74	-1,63	75,4	-17,9	57,1	14,7	-0,3
25,48	67,43	155,74	-1,52	77,7	-17,7	57,1	14,7	-0,3
25,50	67,42	155,74	-1,74	76,6	-17,9	58,3	14,4	-0,3
25,52	68,00	155,74	-1,86	77,7	-18,1	58,3	14,4	-0,3
25,53	66,86	155,74	-1,40	77,7	-17,9	56,0	15,1	-0,3
25,55	67,43	155,74	-1,29	77,7	-17,5	57,1	14,9	-0,3
25,57	68,57	155,74	-1,29	77,7	-17,7	59,4	15,1	-0,3
25,58	68,57	155,74	-1,06	77,7	-17,5	59,4	15,3	-0,3
25,60	66,85	155,74	-1,29	76,6	-17,5	57,1	14,9	-0,3
25,62	66,85	155,74	-1,40	76,6	-17,5	57,1	14,7	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
25,63	67,42	155,74	-1,17	76,6	-17,5	58,3	15,1	-0,3
25,65	66,28	155,74	-1,52	76,6	-17,9	56,0	14,9	-0,3
25,67	66,85	155,74	-1,74	76,6	-17,7	57,1	14,2	-0,3
25,68	65,13	155,74	-1,52	75,4	-17,9	54,8	14,9	-0,3
25,70	66,27	155,74	-1,97	75,4	-18,4	57,1	14,4	-0,3
25,72	65,71	155,74	-1,74	76,6	-17,9	54,8	14,4	-0,3
25,73	65,13	155,74	-1,52	75,4	-17,7	54,8	14,7	-0,3
25,75	65,13	155,74	-1,40	75,4	-17,5	54,8	14,7	-0,3
25,77	65,70	155,74	-1,29	75,4	-17,5	56,0	14,9	-0,3
25,78	65,13	155,74	-1,74	75,4	-17,9	54,8	14,4	-0,3
25,80	65,71	155,74	-1,51	76,6	-17,5	54,8	14,4	-0,3
25,82	68,01	155,74	-1,29	78,9	-17,5	57,1	14,9	-0,3
25,83	68,00	155,74	-1,29	77,7	-17,2	58,3	14,7	-0,3
25,85	66,85	155,74	-1,17	76,6	-17,2	57,1	14,9	-0,3
25,87	67,41	155,74	-1,29	75,4	-17,7	59,4	15,1	-0,3
25,88	66,26	155,74	-1,29	74,3	-17,5	58,3	14,9	-0,3
25,90	66,28	155,74	-0,94	76,6	-17,0	56,0	15,1	-0,3
25,92	65,12	155,74	-1,06	74,3	-17,2	56,0	15,1	-0,3
25,93	63,97	155,74	-1,51	73,1	-17,5	54,8	14,4	-0,3
25,95	66,27	155,74	-1,51	75,4	-17,5	57,1	14,4	-0,3
25,97	65,13	155,74	-1,40	75,4	-17,5	54,8	14,7	-0,3
25,98	65,12	155,74	-1,74	74,3	-17,7	56,0	14,2	-0,3
26,00	65,69	155,74	-1,51	74,3	-17,5	57,1	14,4	-0,3
26,02	66,27	155,74	-1,52	75,4	-17,7	57,1	14,7	-0,3
26,03	65,12	155,74	-1,74	74,3	-17,5	56,0	14,0	-0,3
26,05	63,97	155,74	-1,63	73,1	-17,5	54,8	14,2	-0,3
26,07	66,26	155,74	-1,74	74,3	-17,7	58,3	14,2	-0,3
26,08	65,70	155,74	-1,40	75,4	-17,2	56,0	14,4	-0,3
26,10	66,84	155,74	-1,63	75,4	-17,7	58,3	14,4	-0,3
26,12	66,25	155,74	-1,29	73,1	-17,2	59,4	14,7	-0,3
26,13	66,83	155,74	-1,06	74,3	-17,0	59,4	14,9	-0,3
26,15	65,69	155,74	-1,29	74,3	-17,0	57,1	14,4	-0,3
26,17	67,42	155,74	-0,94	76,6	-17,0	58,3	15,1	-0,3
26,18	66,84	155,74	-1,06	75,4	-17,0	58,3	14,9	-0,3
26,20	66,85	155,74	-0,94	76,6	-17,0	57,1	15,1	-0,3
26,22	66,84	155,74	-1,06	75,4	-17,0	58,3	14,9	-0,3
26,23	66,84	155,74	-1,06	75,4	-17,0	58,3	14,9	-0,3
26,25	65,12	155,74	-1,06	74,3	-16,8	56,0	14,7	-0,3
26,27	65,69	155,74	-1,06	74,3	-17,0	57,1	14,9	-0,3
26,28	65,13	155,74	-1,06	75,4	-16,8	54,8	14,7	-0,3
26,30	66,26	155,74	-0,94	74,3	-16,8	58,3	14,9	-0,3
26,32	66,27	155,74	-1,29	75,4	-17,0	57,1	14,4	-0,3
26,33	65,70	155,74	-1,51	75,4	-17,2	56,0	14,2	-0,3
26,35	64,53	155,74	-1,51	71,9	-17,2	57,1	14,2	-0,3
26,37	65,69	155,74	-1,51	74,3	-17,5	57,1	14,4	-0,3
26,38	64,55	155,74	-1,51	74,3	-17,5	54,8	14,4	-0,3
26,40	63,38	155,74	-1,29	70,8	-17,0	56,0	14,4	-0,3
26,42	63,96	155,74	-1,51	71,9	-17,0	56,0	14,0	-0,3
26,43	63,97	155,74	-1,28	73,1	-16,8	54,8	14,2	-0,3
26,45	64,54	155,74	-1,40	73,1	-17,0	56,0	14,2	-0,3
26,47	64,52	155,74	-1,29	70,8	-17,0	58,3	14,4	-0,3
26,48	64,54	155,74	-1,40	73,1	-17,0	56,0	14,2	-0,3
26,50	63,96	155,74	-1,29	71,9	-17,2	56,0	14,7	-0,3
26,52	64,55	155,74	-1,17	74,3	-16,8	54,8	14,4	-0,3
26,53	65,11	155,74	-1,17	73,1	-16,5	57,1	14,2	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
26,55	64,55	155,74	-0,83	74,3	-16,5	54,8	14,9	-0,3
26,57	67,41	155,74	-0,83	75,4	-16,3	59,4	14,7	-0,3
26,58	67,41	155,74	-0,48	75,4	-15,6	59,4	14,7	-0,3
26,60	64,52	155,74	-1,06	70,8	-16,5	58,3	14,4	-0,3
26,62	66,85	155,74	-1,17	76,6	-16,8	57,1	14,4	-0,3
26,63	65,09	155,74	-0,83	70,8	-16,8	59,4	15,1	-0,3
26,65	65,70	155,74	-1,40	75,4	-17,0	56,0	14,2	-0,3
26,67	65,11	155,74	-0,94	73,1	-16,3	57,1	14,4	-0,3
26,68	64,55	155,74	-1,17	74,3	-16,8	54,8	14,4	-0,3
26,70	66,25	155,74	-0,71	73,1	-16,5	59,4	15,1	-0,3
26,72	66,24	155,74	-1,29	71,9	-17,0	60,6	14,4	-0,3
26,73	64,54	155,74	-1,17	73,1	-16,8	56,0	14,4	-0,3
26,75	62,81	155,74	-1,51	70,8	-17,2	54,8	14,2	-0,3
26,77	62,81	155,74	-1,51	70,8	-17,0	54,8	14,0	-0,3
26,78	64,52	155,74	-1,51	70,8	-17,0	58,3	14,0	-0,3
26,80	62,22	155,74	-1,51	68,5	-17,0	56,0	14,0	-0,3
26,82	61,65	155,74	-1,28	68,5	-16,8	54,8	14,2	-0,3
26,83	64,53	155,74	-1,28	71,9	-16,8	57,1	14,2	-0,3
26,85	62,22	155,74	-1,29	68,5	-17,0	56,0	14,4	-0,3
26,87	62,24	155,74	-1,40	70,8	-17,0	53,7	14,2	-0,3
26,88	62,24	155,74	-1,17	70,8	-16,8	53,7	14,4	-0,3
26,90	64,55	155,74	-0,83	74,3	-16,5	54,8	14,9	-0,3
26,92	65,11	155,74	-1,06	73,1	-16,5	57,1	14,4	-0,3
26,93	65,09	155,74	-1,40	70,8	-17,0	59,4	14,2	-0,3
26,95	63,37	155,74	-1,17	69,6	-16,5	57,1	14,2	-0,3
26,97	64,53	155,74	-1,28	71,9	-16,5	57,1	14,0	-0,3
26,98	65,69	155,74	-0,83	74,3	-16,5	57,1	14,9	-0,3
27,00	63,38	155,74	-1,17	70,8	-16,3	56,0	14,0	-0,3
27,02	65,10	155,74	-1,17	71,9	-16,5	58,3	14,2	-0,3
27,03	63,38	155,74	-1,06	70,8	-16,5	56,0	14,4	-0,3
27,05	65,09	155,74	-0,71	70,8	-15,9	59,4	14,4	-0,3
27,07	64,53	155,74	-0,94	71,9	-16,1	57,1	14,2	-0,3
27,08	64,52	155,74	-0,94	70,8	-16,5	58,3	14,7	-0,3
27,10	64,53	155,74	-0,71	71,9	-16,1	57,1	14,7	-0,3
27,12	65,67	155,74	-0,60	71,9	-15,9	59,4	14,7	-0,3
27,13	63,95	155,74	-1,17	70,8	-16,1	57,1	13,7	-0,3
27,15	63,37	155,74	-1,29	69,6	-17,0	57,1	14,4	-0,3
27,17	63,95	155,74	-0,94	70,8	-16,1	57,1	14,2	-0,3
27,18	61,65	155,74	-1,06	68,5	-16,3	54,8	14,2	-0,3
27,20	62,80	155,74	-1,28	69,6	-16,5	56,0	14,0	-0,3
27,22	62,81	155,74	-1,40	70,8	-17,0	54,8	14,2	-0,3
27,23	61,06	155,74	-1,28	66,1	-16,5	56,0	14,0	-0,3
27,25	62,81	155,74	-1,17	70,8	-16,5	54,8	14,2	-0,3
27,27	63,39	155,74	-0,94	71,9	-16,3	54,8	14,4	-0,3
27,28	63,95	155,75	-1,06	70,8	-16,5	57,1	14,4	-0,3
27,30	62,80	155,75	-0,83	69,6	-16,1	56,0	14,4	-0,3
27,32	62,81	155,75	-1,17	70,8	-16,3	54,8	14,0	-0,3
27,33	62,23	155,75	-1,28	69,6	-16,3	54,8	13,7	-0,3
27,35	63,95	155,75	-0,60	70,8	-15,4	57,1	14,2	-0,3
27,37	64,52	155,75	-0,37	70,8	-15,2	58,3	14,4	-0,3
27,38	65,67	155,75	-0,48	71,9	-15,6	59,4	14,7	-0,3
27,40	63,95	155,75	-0,37	70,8	-15,4	57,1	14,7	-0,3
27,42	65,09	155,75	-0,60	70,8	-15,6	59,4	14,4	-0,3
27,43	65,10	155,75	-0,71	71,9	-15,6	58,3	14,2	-0,3
27,45	63,95	155,75	-0,60	70,8	-15,4	57,1	14,2	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1	Gage1	Gage2	Gage2	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	bar
27,47	63,95	155,75	-0,94	70,8	-16,1	57,1	14,2	-0,3
27,48	62,23	155,75	-0,94	69,6	-16,5	54,8	14,7	-0,3
27,50	64,51	155,75	-0,71	69,6	-15,9	59,4	14,4	-0,3
27,52	62,23	155,75	-0,83	69,6	-15,9	54,8	14,2	-0,3
27,53	61,63	155,75	-1,28	66,1	-16,3	57,1	13,7	-0,3
27,55	62,23	155,75	-1,28	69,6	-16,5	54,8	14,0	-0,3
27,57	61,65	155,75	-0,94	68,5	-16,3	54,8	14,4	-0,3
27,58	61,08	155,75	-1,17	68,5	-16,3	53,7	14,0	-0,3
27,60	63,36	155,75	-1,17	68,5	-16,1	58,3	13,7	-0,3
27,62	59,34	155,75	-1,06	66,1	-16,3	52,6	14,2	-0,3
27,63	61,65	155,75	-0,83	68,5	-15,9	54,8	14,2	-0,3
27,65	62,22	155,75	-0,60	68,5	-15,4	56,0	14,2	-0,3
27,67	63,37	155,75	-1,05	69,6	-16,1	57,1	14,0	-0,3
27,68	61,65	155,75	-0,60	68,5	-15,6	54,8	14,4	-0,3
27,70	63,38	155,75	-0,71	70,8	-15,6	56,0	14,2	-0,3
27,72	65,09	155,75	-1,05	70,8	-15,9	59,4	13,7	-0,3
27,73	62,79	155,75	-0,71	68,5	-15,9	57,1	14,4	-0,3
27,75	65,09	155,75	-0,82	70,8	-15,4	59,4	13,7	-0,3
27,77	64,50	155,75	-0,37	68,5	-15,4	60,6	14,7	-0,3
27,78	63,37	155,75	-0,60	69,6	-15,6	57,1	14,4	-0,3
27,80	65,67	155,75	-0,14	71,9	-14,9	59,4	14,7	-0,3
27,82	62,79	155,75	-0,83	68,5	-16,1	57,1	14,4	-0,3
27,83	62,22	155,75	-0,14	68,5	-15,2	56,0	14,9	-0,3
27,85	63,94	155,75	-0,37	69,6	-15,2	58,3	14,4	-0,3
27,87	63,93	155,75	-0,71	68,5	-15,6	59,4	14,2	-0,3
27,88	65,09	155,75	-0,71	70,8	-15,6	59,4	14,2	-0,3
27,90	63,37	155,75	-0,37	69,6	-15,2	57,1	14,4	-0,3
27,92	61,64	155,75	-0,37	67,3	-14,9	56,0	14,2	-0,3
27,93	62,22	155,75	-0,60	68,5	-15,4	56,0	14,2	-0,3
27,95	61,63	155,75	-0,48	66,1	-15,4	57,1	14,4	-0,3
27,97	61,64	155,75	-0,83	67,3	-15,6	56,0	14,0	-0,3
27,98	61,65	155,75	-0,60	68,5	-15,4	54,8	14,2	-0,3
28,00	61,65	155,75	-0,82	68,5	-15,4	54,8	13,7	-0,3
28,02	61,06	155,75	-1,17	66,1	-16,1	56,0	13,7	-0,3
28,03	61,64	155,75	-0,71	67,3	-15,6	56,0	14,2	-0,3
28,05	59,92	155,75	-0,83	67,3	-15,9	52,6	14,2	-0,3
28,07	61,07	155,75	-1,05	67,3	-15,9	54,8	13,7	-0,3
28,08	60,49	155,75	-0,94	66,1	-15,6	54,8	13,7	-0,3
28,10	61,06	155,75	-0,94	66,1	-15,6	56,0	13,7	-0,3
28,12	61,07	155,75	-0,94	67,3	-15,6	54,8	13,7	-0,3
28,13	59,92	155,75	-0,82	66,1	-15,4	53,7	13,7	-0,3
28,15	60,50	155,75	-0,71	67,3	-15,6	53,7	14,2	-0,3
28,17	59,92	155,75	-0,82	66,1	-15,4	53,7	13,7	-0,3
28,18	61,65	155,75	-0,82	68,5	-15,4	54,8	13,7	-0,3
28,20	61,64	155,75	-0,94	67,3	-16,1	56,0	14,2	-0,3
28,22	61,07	155,75	-0,60	67,3	-15,2	54,8	14,0	-0,3
28,23	61,65	155,75	-0,60	68,5	-15,4	54,8	14,2	-0,3
28,25	60,49	155,75	-0,60	66,1	-15,4	54,8	14,2	-0,3
28,27	61,07	155,75	-0,48	67,3	-14,9	54,8	14,0	-0,3
28,28	61,64	155,75	-0,25	67,3	-14,9	56,0	14,4	-0,3
28,30	61,06	155,75	-0,37	66,1	-14,9	56,0	14,2	-0,3
28,32	63,94	155,75	0,09	69,6	-14,7	58,3	14,9	-0,3
28,33	62,79	155,75	-0,25	68,5	-14,9	57,1	14,4	-0,3
28,35	62,79	155,75	-0,48	68,5	-14,9	57,1	14,0	-0,3
28,37	63,92	155,75	-0,37	67,3	-14,9	60,6	14,2	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1	Gage1	Gage2	Gage2	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	Circunf (10 ⁻⁶)	Axial (10 ⁻⁶)	bar
28,38	62,78	155,75	-0,14	67,3	-14,7	58,3	14,4	-0,3
28,40	61,64	155,75	-0,82	67,3	-15,4	56,0	13,7	-0,3
28,42	62,20	155,75	-0,48	66,1	-15,2	58,3	14,2	-0,3
28,43	63,36	155,75	-0,60	68,5	-15,2	58,3	14,0	-0,3
28,45	62,21	155,75	-0,60	67,3	-15,6	57,1	14,4	-0,3
28,47	61,06	155,75	-0,37	66,1	-14,9	56,0	14,2	-0,3
28,48	61,64	155,75	-0,48	67,3	-15,2	56,0	14,2	-0,3
28,50	63,35	155,75	-0,37	67,3	-14,9	59,4	14,2	-0,3
28,52	60,49	155,75	-0,82	66,1	-15,4	54,8	13,7	-0,3
28,53	60,49	155,75	-0,82	66,1	-15,4	54,8	13,7	-0,3
28,55	60,49	155,75	-0,59	66,1	-14,9	54,8	13,7	-0,3
28,57	60,47	155,75	-0,60	63,8	-15,4	57,1	14,2	-0,3
28,58	58,76	155,75	-0,71	65,0	-15,2	52,6	13,7	-0,3
28,60	62,21	155,75	-0,37	67,3	-14,9	57,1	14,2	-0,3
28,62	60,49	155,75	-0,25	66,1	-14,7	54,8	14,2	-0,3
28,63	62,21	155,75	-0,37	67,3	-14,9	57,1	14,2	-0,3
28,65	61,64	155,75	-0,37	67,3	-14,7	56,0	14,0	-0,3
28,67	62,22	155,75	-0,48	68,5	-15,2	56,0	14,2	-0,3
28,68	61,06	155,75	-0,25	66,1	-14,7	56,0	14,2	-0,3
28,70	62,21	155,75	-0,71	67,3	-15,6	57,1	14,2	-0,3
28,72	61,63	155,75	-0,37	66,1	-14,9	57,1	14,2	-0,3
28,73	62,22	155,75	-0,14	68,5	-14,5	56,0	14,2	-0,3
28,75	62,21	155,75	-0,02	67,3	-14,7	57,1	14,7	-0,3
28,77	63,93	155,75	0,21	68,5	-14,5	59,4	14,9	-0,3
28,78	63,36	155,75	-0,14	68,5	-14,7	58,3	14,4	-0,3
28,80	63,36	155,75	0,21	68,5	-14,2	58,3	14,7	-0,3
28,82	63,93	155,75	-0,02	68,5	-14,7	59,4	14,7	-0,3
28,83	63,93	155,75	0,09	68,5	-14,5	59,4	14,7	-0,3
28,85	62,20	155,75	-0,14	66,1	-14,5	58,3	14,2	-0,3
28,87	63,36	155,75	0,09	68,5	-14,7	58,3	14,9	-0,3
28,88	62,77	155,75	-0,02	66,1	-14,7	59,4	14,7	-0,3
28,90	63,36	155,75	-0,25	68,5	-14,7	58,3	14,2	-0,3
28,92	62,22	155,75	-0,14	68,5	-14,7	56,0	14,4	-0,3
28,93	61,04	155,75	0,21	63,8	-14,7	58,3	15,1	-0,3
28,95	62,21	155,75	0,21	67,3	-14,5	57,1	14,9	-0,3
28,97	62,78	155,75	-0,02	67,3	-14,5	58,3	14,4	-0,3
28,98	61,06	155,75	-0,37	66,1	-14,9	56,0	14,2	-0,3
29,00	61,62	155,75	-0,37	65,0	-14,9	58,3	14,2	-0,3
29,02	62,21	155,75	-0,14	67,3	-14,7	57,1	14,4	-0,3
29,03	61,63	155,75	-0,48	66,1	-15,2	57,1	14,2	-0,3
29,05	61,63	155,75	-0,14	66,1	-14,5	57,1	14,2	-0,3
29,07	62,21	155,75	-0,14	67,3	-14,7	57,1	14,4	-0,3
29,08	61,05	155,75	-0,37	65,0	-14,9	57,1	14,2	-0,3
29,10	59,90	155,75	-0,37	63,8	-14,7	56,0	14,0	-0,3
29,12	59,90	155,75	-0,37	63,8	-14,7	56,0	14,0	-0,3
29,13	59,33	155,75	-0,25	63,8	-14,9	54,8	14,4	-0,3
29,15	59,91	155,75	-0,37	65,0	-14,9	54,8	14,2	-0,3
29,17	61,62	155,75	-0,14	65,0	-14,7	58,3	14,4	-0,3
29,18	59,90	155,75	-0,25	63,8	-14,7	56,0	14,2	-0,3
29,20	60,49	155,75	-0,37	66,1	-14,9	54,8	14,2	-0,3
29,22	61,63	155,75	-0,02	66,1	-14,5	57,1	14,4	-0,3
29,23	61,06	155,75	-0,37	66,1	-14,7	56,0	14,0	-0,3
29,25	61,64	155,75	0,21	67,3	-14,5	56,0	14,9	-0,3
29,27	61,06	155,75	0,21	66,1	-14,2	56,0	14,7	-0,3
29,28	61,04	155,75	-0,02	63,8	-14,7	58,3	14,7	-0,3

Tempo	Experimental	Modelo de Burger	Experimental	Gage1 Circunf	Gage1 Axial	Gage2 Circunf	Gage2 Axial	pressão
(min)	Def circunf. média (10 ⁻⁶)	Def circunf. (10 ⁻⁶)	Def.Ax.média (10 ⁻⁶)	bar				
29,30	62,20	155,75	0,44	66,1	-14,5	58,3	15,3	-0,3
29,32	62,79	155,75	0,21	68,5	-14,9	57,1	15,3	-0,3
29,33	61,62	155,75	0,44	65,0	-14,2	58,3	15,1	-0,3
29,35	63,34	155,75	0,67	66,1	-13,8	60,6	15,1	-0,3
29,37	62,77	155,75	0,44	66,1	-14,2	59,4	15,1	-0,3
29,38	62,21	155,75	0,55	67,3	-13,6	57,1	14,7	-0,3
29,40	62,20	155,75	0,44	66,1	-14,2	58,3	15,1	-0,3
29,42	61,62	155,75	0,21	65,0	-14,2	58,3	14,7	-0,3
29,43	60,48	155,75	0,32	65,0	-14,2	56,0	14,9	-0,3
29,45	61,06	155,75	0,32	66,1	-14,5	56,0	15,1	-0,3
29,47	61,04	155,75	-0,02	63,8	-14,2	58,3	14,2	-0,3
29,48	62,77	155,75	0,44	66,1	-14,0	59,4	14,9	-0,3
29,50	62,20	155,75	-0,02	66,1	-14,5	58,3	14,4	-0,3
29,52	60,47	155,75	-0,25	63,8	-14,7	57,1	14,2	-0,3
29,53	60,47	155,75	-0,37	63,8	-14,5	57,1	13,7	-0,3
29,55	60,48	155,75	-0,14	65,0	-14,7	56,0	14,4	-0,3
29,57	58,74	155,75	-0,25	61,5	-14,7	56,0	14,2	-0,3
29,58	60,48	155,75	-0,37	65,0	-14,7	56,0	14,0	-0,3
29,60	59,90	155,75	0,21	63,8	-14,5	56,0	14,9	-0,3
29,62	59,33	155,75	-0,25	63,8	-14,7	54,8	14,2	-0,3
29,63	61,04	155,75	-0,48	63,8	-15,2	58,3	14,2	-0,3
29,65	59,32	155,75	-0,14	62,7	-14,5	56,0	14,2	-0,3
29,67	59,32	155,75	-0,25	62,7	-14,5	56,0	14,0	-0,3
29,68	58,75	155,75	-0,14	62,7	-14,7	54,8	14,4	-0,3
29,70	59,90	155,75	-0,25	63,8	-14,7	56,0	14,2	-0,3
29,72	59,31	155,75	0,21	61,5	-14,0	57,1	14,4	-0,3
29,73	61,04	155,75	0,09	63,8	-14,2	58,3	14,4	-0,3
29,75	63,35	155,75	-0,02	67,3	-14,5	59,4	14,4	-0,3
29,77	60,47	155,75	0,21	63,8	-14,2	57,1	14,7	-0,3
29,78	61,04	155,75	-0,14	63,8	-14,7	58,3	14,4	-0,3
29,80	59,90	155,75	0,21	63,8	-14,2	56,0	14,7	-0,3
29,82	60,47	155,75	-0,14	63,8	-14,7	57,1	14,4	-0,3
29,83	59,33	155,75	0,21	63,8	-14,2	54,8	14,7	-0,3
29,85	61,63	155,75	0,32	66,1	-14,2	57,1	14,9	-0,3
29,87	62,77	155,75	0,44	66,1	-14,2	59,4	15,1	-0,3
29,88	61,62	155,75	0,78	65,0	-13,6	58,3	15,1	-0,3
29,90	61,61	155,75	0,55	63,8	-14,0	59,4	15,1	-0,3
29,92	61,04	155,75	0,44	63,8	-13,8	58,3	14,7	-0,3
29,93	62,19	155,75	0,44	65,0	-13,8	59,4	14,7	-0,3
29,95	62,20	155,75	0,44	66,1	-13,8	58,3	14,7	-0,3
29,97	59,90	155,75	0,21	63,8	-14,2	56,0	14,7	-0,3
29,98	61,63	155,75	0,55	66,1	-13,8	57,1	14,9	-0,3
30,00	62,77	155,75	0,09	66,1	-14,0	59,4	14,2	-0,3