8 Referências bibliográficas

- AGENCY, CENTRAL INTELLIGENCE. The World Factbook, 2013. Acesso em: 2014.
- [2]. GERHARDUS H.K., BRONGERS N.G. Corrosion Costs And Preventive Stratégies In The United Statés. Nace International Leaders In Corrosion Control Technology. ISSN FHWA-RD-01-156.
- [3]. MOHITPOUR, M., GOLSHAN H., MURRAY, A. Pipeline Desing And Construction: A Practical Approach. 2. ed. New York: [s.n.], 2003.
- [4]. DUELL, J.M, WILSON, J.M., KESSLER, M.R. Analysis Of A Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System. International Journal Of Pressure Vessel And Piping, 2008.
- [5]. ISO/TS 24817. Petroleum, Petrochemical And Natural Gas Industries
 Composite Repairs For Pipework Qualification And Design, Installation, Testing And Inspection, 2006.
- [6]. FREIRE, J.L.F., VIEIRA, R.D., DINIZ, J.C. Effectiveness Of Composite Repairs Applied To Damaged Pipeline. Experimental Techniques, v. 31, n. 5, p. 59-66, September-October 2007.
- [7]. PEREZ ROSAS, M.A., VIEIRA, R.D., AND FREIRE, J.L.F. Use Of Small-Scale Pipeline Specimens To Test A Steel-Adhesive Repair System. Experimental Techniques, v. 31, n. 6, p. 64-72, November-December 2007.

- [8]. FREIRE, J.L.F., PERRUT, V.A., BRAGA, A.M.B., VIEIRA, R.D., RIBEIRO, A.S., ROSAS, M.A.P. Use Of FBG Strain Gages On A Pipeline Specimen Repaired With A CFRE Composite. Experimental Techniques, November 2012.
- [9]. MENICONI, L.C.M., VIEIRA, R.D., FREIRE, J.L.F., DINIZ, J.L.E CASTRO, J.T.P. Análise Do Desempenho De Sistemas De Reparo De Dutos Por Materiais Compostos. Abendi, n. 7, p. 35-39, Março 2005.
- [10]. M.A.P. ROSAS, J.L.F. FREIRE, R.D. VIEIRA, J.S. DIAS, J.C.G. GRION, L. O. LIMA, N. F. SOARES JR. Análise Do Desempenho De Um Reparo Em Duto Corroído Utilizando Multicamadas Metálicas. Boletim Técnico Da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 51, n. 1/3, p. 37-43, Agosto 2008.
- [11]. MATTHEW FENTON, TASNIM HASSAN. Low-Cycle Fatigue Failure Responses Of Short And Long Radius Elbows. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [12]. BEDOYA, J., ALEXANDER, C., PRECHT, T. Repair Of High Pressure Pipe Fittings Using Composite Materials. Proceedings Of The 8th International Pipeline Conference, September 2010. ISSN IPC2010-31537.
- [13]. MASAO UESAKA, HIROSHI NOMURA, NOBUYUKI KOJIMA, JUNICHI YAMAZAKI, ITARU MUROYA AKIHITO OTANI. Investigation On Fatigue Curve Against Cyclic Loads Of AN Earthquake For Piping Components. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [14]. MARK STONEHOUSE, CHARLES BECHT IV, TONY PAULIN, CHARLES BECHT V. Burst Tests Of B16.9 Welded Tees.
 Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [15]. TIMOTHY S. MALLY, ROGER H. WALKER, AMANDA P. HAWKINS, MICHAEL W. KELLER. Repair Of Through-Wall

Piping Defects Using Carbon Fiber Composite Repair System. **Proceedings Of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference**, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.

- [16]. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME PCC-2, Repair Of Pressure Equipment And Piping, 2008 Edition.
- [17]. ALEXANDER, C. The Role Of Composite Repair Technology In Rehabilitating Piping And Pipelines. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [18]. CHRIS ALEXANDER, JIM SOUZA, CASEY WHALEN. Composite Repair Performance At Elevated Temperatures. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA.
- [19]. CHRIS ALEXANDER, BRENT VYVIAL. Intentional Destructive Testing: A Means For Establishing Mechanical Integrity In Plants, Facilities, And Pipelines. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [20]. AKULA, V. M. K. Global-Local Analysis Of A Composite Riser. Proceedings Of The ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Anaheim, California, USA, July 20-24 2014.
- [21]. J.M DUELL, J.M. WILSON, M.R. KESSLER. Analysis Of A Carbon Composite Overwrap Pipeline Repair System. International journal of pressure vessels and piping, August, 2008.
- [22]. VIEIRA, R. D. Relatório-Testes Em Espécimes Tubulares De Trechos Não Retos De Dutos Reparados Por Meio De Materiais Compostos. Centro De Tecnologia Em Dutos. Rio de Janeiro. 2014.
- [23]. VIEIRA, R.B. Propriedades Elásticas De Materiais Compósitos Sob Tração e Compressão Usando O Método DIC, Projeto de Graduação, Departamento De Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2013.
- [24]. FREIRE, JOSÉ LUIZ F. Notas De Aulas, Integridade De Dutos.[S.1.]. 2013.

- [25]. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.4, Pipeline Transportation System For Liquids Hydrocarbons And Other Liquids. ASME Code for Pressure Piping, 1998.
- [26]. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.B Manual For Determining The Remaining Strength Of Corroded Pipelines, 2012.
- [27]. DET NORSKE VERITAS. Recommended Practice DNV-RP-F101 Corroded Pipelines, October 2010.
- [28]. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Recommended Practice 579, Fitness For Service, 2000.
- [29]. ROBERT M. JONES. Mechanics Of Composite Materials. second. ed. [S.l.]: [s.n.], 1999.
- [30]. LUZ STELLA A M. Falla De Los Materiales Compuestos Laminados.Scientia Et Technica, n. 25, Agosto 2014.
- [31]. RAISSA PORTELA SAATKAMP. Análise De Tensões Em Um Duto Curvado. Departamento De Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Julho 2013.
- [32]. PAUL CAYLAR. Application Of A Failure Assessment Diagram Topipes Presenting Dents And Gauges. Arts&Métiers – Paris Tech,Departamento De Engenharia Mecânica, PUC-Rio. [S.1.]. 2009.

Apêndice

A Resultados do levantamento dimensional

A continuação se apresenta os resultados obtidos do levantamento dimensional para cada espécime testado.

Instrumentos de medição e incerteza

A Tabela A.1apresenta as incertezas dos instrumentos utilizados nas medições feitas, o equipo de ultra som foi calibrado com um padrão de 5 mm de aço.

Medida	Instrumento	Incerteza
Comprimento entre tampos	trena metálica Starrett - 5m	± 2mm
Perímetro externo do tubo (π.D)	trena metálica Wonder - 2m	± 1mm
Largura dos rebaixos	paquímetro Mitutoyo - 150mm – 0,05mm	± 0,1mm
Comprimento dos rebaixos	régua metálica Starrett – 100cm	± 0,5mm
Raios de adoçamento	calibre de raios Starrett	± 0,5mm
Cordas das curvas	trena metálica Starrett - 5m	± 3 mm
Flechas das curvas	régua metálica Starrett – 100cm	± 2mm
Espessuras - ultra-som	Olympus NDT Model 26MG (1)	± 0,1mm

Tabela A.1 - Instrumentos de medição e incerteza.

A seguir são apresentados os resultados do levantamento dimensional de cada espécime testado por pressão interna

Medições dos espécimes curvados a frio



Figura A.1 - Medidas gerais dos espécimes curvos a frio.

PEÇA	π.ØA	π.ØB	π.ØC	π.ØD	π.ØE	F	G	Η	Ι
1	1013	1013	1012	1013	1014	908	2142	78	1997
2	1010	1012	1012,5	1011	1009	897	2105	78	2005
3	1011	1011	1011,5	1012	1014	898	2108	72	2015
4	1011	1012	1011	1012	1012,5	902	2110	70	2000
5	1010,5	1010,5	1011	1010	1013	890	2110	81	2005
6	1011,5	1008	1008,5	1011,5	1012	890	2093	78	1993
7	1012	1011	1011	1010	1013	889	2094	80	1985

Tabela A.2 - Valores das medidas gerais dos espécimes curvos a frio.



Figura A.2 - Medidas nos rebaixos dos espécimes curvos a frio.

PEÇAS	W1	W2	W3	W4	W5	L1	L2
1	60,5	60,4	60,45	60,45	60,3	320	320
2	60,3	60	60,1	60,3	60,3	321	320
3	60,3	60,3	60,5	60,4	60,3	320,5	320
4	60,2	60,4	60,4	60,5	60,4	321	320,5
5	60,5	60,5	60,5	60,5	60,6	321	320,5
6	60,4	60,3	60,3	60,5	60,5	320,5	320
7	60,4	60,5	60,4	60,5	60,5	320,5	320,5

Tabela A.3 - Valores das medidas nos rebaixos dos espécimes curvos a frio.

		F	PEÇAS				
MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7
1	2,25	2,15	2,12	2,49	2,65	2,56	2,45
2	2,2	2,55	2,16	2,4	2,5	2,53	2,09
3	2,33	2,6	2,15	2,44	2,47	2,78	2,02
4	2,3	2,38	2,16	2,36	2,43	2,52	1,95
5	2,34	2,2	2,3	2,75	2,61	2,2	2,1
6	1,9	2,18	2,3	2,52	2,62	2,46	2,45
7	1,8	2,52	2,2	2,4	2,53	2,4	1,96
8	1,95	2,6	2,26	2,35	2,43	2,61	2,05
9	1,9	2,3	2,22	2,37	2,45	2,44	1,89
10	2,05	2,05	2,3	2,76	2,48	2,3	2,09
11	9,45	9,23	9,55	9,7	9,45	9,17	9,44
12	9,4	9,26	9,33	9,71	9,4	9,21	9
13	9,38	9,2	9,12	9,76	9,4	9,24	9,02
14	9	9,45	9,3	9,36	9,69	9,13	9,6
15	9	9,42	9,15	9,4	9,69	9,21	9,43
16	8,95	9,36	9,25	9,45	9,78	9,3	9,31
17	9,05	9,16	9,24	9,63	9,6	9,12	9,57
18	9	9,26	9,07	9,77	9,63	9,23	9,21
19	10,2	9,46	9,6	9,45	9,8	9,75	9,83
20	9,4	9,1	9,68	9,5	9,3	9,54	9,77
21	9,4	9,5	10,25	9,27	9,53	9,2	9,75

Tabela A.4 - Valores das medidas de espessuras de parede curvos a frio.



Figura A.3 - Medidas de espessuras de parede espécimes curvos a frio.

Medições dos espécimes curvados a quente



Figura A.4 - Medidas gerais dos espécimes curvos a quente.

PEÇA	π.ØA	π.ØB	π.ØC	π.ØD	π.ØE	F	G	Н	Ι
1	1018	1018	1017	1016	1016	689	1695	214	1045
2	1015	1015	1015	1015	1015	675	1662	219	1050
3	1016	1015	1014	1014,5	1014,5	667	1655	215	1045
4	1015	1015,5	1014,5	1015	1015	662	1653	215	1038
5	1014	1015	1014	1014	1014	677	1660	211	1040
6	1015	1015	1014	1015	1015	667	1660	220	1045
7	1014	1014	1013	1014	1014	670	1655	214	1040

Tabela A.5 - Valores das medidas dos espécimes curvos a quente.



Figura A.5 - Medidas nos rebaixos dos espécimes curvos a quente.

PEÇAS	W1	W2	W3	W4	W5	L1	L2
1	60,45	60,5	60,5	60,25	60,15	321	321
2	60,5	60,3	60	60,1	60,2	321	321
3	60,2	60,3	60,4	60,2	60,2	322	322
4	60,1	60,3	60,2	60,2	60,2	322	322
5	59,9	59,7	59,8	59,9	59,6	321	321
6	60	60,1	60,2	60,2	60	321	321
7	60,2	60,3	60,3	60,3	60,3	322	322

Tabela A.6 - Valores das medidas nos rebaixos dos espécimes curvos a quente.



Figura A. 6 - Medidas de espessuras de parede dos espécimes curvos a quente.

		PEÇAS									
MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7				
1	1,67	1,97	1,9	1,98	2,1	1,95	1,55				
2	1,5	2,3	1,78	1,38	1,78	1,95	1,4				
3	1,7	2,37	1,67	1,26	1,52	1,8	1,95				
4	1,5	2,04	1,78	1,39	1,15	2,05	1,7				
5	2,12	1,98	1,78	1,26	1,65	2,15	1,35				
6	1,52	1,83	1,86	2	1,8	1,9	1,35				
7	1,64	2,02	1,86	1,46	1,45	1,58	1,8				
8	1,58	2,15	1,72	1,4	1,35	1,7	2,8				
9	1,5	1,85	1,73	1,43	0,95	2	1,65				
10	2,09	1,85	2,03	1,45	1,45	2,2	1,45				
11	8,48	8,3	8,52	8,4	8,62	8,45	8,35				
12	8,27	8,7	8,47	8,22	8,45	8,35	8,1				
13	8,61	8,55	8,22	7,98	8,1	8,6	8,3				
14	8,4	8,45	8,47	8,55	8,38	8,3	7,95				
15	8,37	8,45	8,26	8,1	8,2	8,45	7,95				
16	8,58	8,58	8,5	8,15	8	8,6	8,35				
17	8,61	8,36	8,25	8,22	8,7	8,45	8,15				
18	8,08	8,73	8,43	7,65	7,75	8,4	7,7				
19	11,3	11,49	12,05	11,5	11,52	11,9	11,7				
20	9,6	9,4	9,4	9,7	9,7	9,9	10,1				
21	9,8	9,8	9,5	9,2	9,3	9,8	9,15				

Tabela A.7 - Valores das medidas de espessuras de parede dos espécimes curvos a quente.

Medições dos espécimes com redução concêntrica



Figura A.7 - Medidas gerais dos espécimes com redução concêntrica.

PEÇA	π.ØA	π.ØB	π.ØC	π.ØD	π.ØE	π.ØF	L10	L12	Lt
1	1019	1019	859	860	858	1016	575	678	1419
2	1020	1020	860	860	859	1018	575	671	1407
3	1020	1020	860	860	859	1017	574	677	1412
4	1020	1020	860	860	858	1017	575	674,5	1410
5	1019,5	1019,5	860	860	857	1018,5	574	671	1404
6	1020	1020	860	860	857	1016	577	676	1411
7	1020	1020	860	860	857	1016	577	673	1411

Tabela A.8 - Valores das medidas gerais dos espécimes com redução concêntrica.



Figura A.8 - Medidas de rebaixos dos espécimes com redução concêntrica.

PEÇAS	W1	W2	W3	W4	L1	L2	L3
1	99,7	100	99,6	99,2	162	162	162
2	99	99,1	99,2	99	162	162	162
3	99,4	98,8	99,1	99	162	162	162
4	99,1	99,3	99	99	162	162	162,5
5	99,4	99,8	99,9	99,4	162	162	162,5
6	99,3	99,5	99,6	99,4	162,5	162	162,5
7	99	98,8	99	98,6	162	162	162

Tabela A.9 - Valores das medidas de rebaixos dos espécimes com redução concêntrica.

			PEÇA	S			
MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7
1	2,7	3,53	3,69	3,1	3,22	3,43	3,83
2	3	3,64	3,9	3,6	2,92	3,58	4,16
3	3,15	4,18	3,74	3,41	3,36	3,35	4,3
4	3,63	4,74	4,35	3,83	3,67	3,9	4,27
5	3,67	4,03	4,22	4,18	3,95	4,12	4,09
6	2,9	3,73	3,98	3,43	3,15	3,83	3,9
7	2,75	3,82	4,06	3,56	2,79	3,52	4
8	2,85	4,27	3,7	3,52	3,36	3,4	4,21
9	3,47	4,63	4,25	3,81	3,7	4,15	4,12
10	3,77	4,08	4,2	3,87	3,8	4	4,1
11	2,7	3,5	3,8	3,5	2,8	3,75	3,65
12	2,05	3,96	4,15	3,86	2,85	3,53	3,93
13	2,3	4,66	4,15	3,5	3,87	3,4	4,52
14	3,35	4,3	4,25	4,15	3,61	4,2	4,39
15	3,75	4	4,29	4,1	3,76	4,22	4,33
16	9,7	9,96	9,95	9,8	9,88	9,77	10,13
17	10,5	10,4	9,95	10,24	10,36	9,88	10,7
18	11,3	10,8	10,7	10,61	11,19	10,85	10,98
19	9,5	10,07	10,26	9,7	9,9	10,25	10,06
20	10,2	10,96	10,36	9,63	10,43	10,53	10,93
21	10,7	10,45	11,13	10,5	10,84	11,1	11,3
22	10,32	9,66	10	10,82	10,31	10	10,27
23	10,3	10,85	10,3	9,9	10,8	11,22	10,5
24	9,3	9,49	9,26	9,47	9,35	9,38	9,4
25	9,32	9,56	9,32	9,26	9,44	9,45	9,75
26	9,8	9,76	10,28	9,86	9,26	9,33	9,44
27	9,95	9,36	9,48	9,86	9,62	9,75	9,52

Tabela A.10 - Valores das medidas de espessura de parede dos espécimes com redução concêntrica.



Figura A.9 - Medidas de espessura de parede dos espécimes com redução concêntrica.

Medições dos espécimes tipo Tê



Figura A.10 - Medidas gerais dos espécimes tipo Tê.

MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7
π.ØA	1021	1021	1020	1020	1020,5	1021	1019
π.ØB	1021	1020	1020	1020	1020,5	1020,5	1019
π.ØC	1020	1020	1020	1020,5	1020,5	1020,5	1019
π.ØD	1021	1020	1020	1021	1020,5	1020,5	1019,5
π.ØE	860	860	860	861	860,5	859,5	860
π.ØF	860	860	860	860,5	860,5	860	860
G	675	675	677	672	678	675	671
Н	682	681	679	680	680	678	680
Ι	514	513	511	512	513	510	512
J	400	390	398	396	393	395	392
K	560	555	559	560	561	561	550
L	1624	1624	1621	1618	1620	1619	1620

Tabela A.11 - Valores das medidas gerais dos espécimes tipo Tê.



Figura A.11 - Medidas de rebaixos dos espécimes tipo Tê.

MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7
W1	60	59,7	60	59,5	59,4	59,6	59,6
W2	60	60	59,9	59,4	59,6	59,4	59,5
W3	60,2	59,6	59,5	59,6	59,2	59	59,3
W4	59,8	60	59,6	59,6	59,6	59,8	59,8
W5	59,5	59,8	59,7	59,8	59,8	59,9	59,8
W6	59,3	59,8	59,7	59,9	59,7	59,8	59,8
L10	166	167,5	167,5	167	168	168	168
L12	166	167	166,5	167	168	168	167

Tabela A.12 - Valores das medidas de rebaixos dos espécimes tipo Tê.



Figura A.12 - Medidas de espessuras de parede dos espécimes tipo Tê.

PEÇA TÊ							
MEDIDA	1	2	3	4	5	6	7
1	2,85	2,42	2,15	2,75	3,03	2,5	2,65
2	2,7	2,23	2,33	2,57	2,85	2,3	2,42
3	2,8	2,55	2,05	2,7	3,3	2,2	2,68
4	2,57	2,65	2,2	2,4	3,03	2,5	2,75
5	2,56	2,42	2,25	2,3	3,2	2,5	2,45
6	2,6	2,65	1,9	2,5	3,7	2,4	2,7
7	3,55	3,3	2,6	3,05	3,4	3,1	2,97
8	3,25	3,2	2,7	3,05	3,04	3,1	2,72
9	3,4	3,2	3	3	3,6	3,7	2,9
10	3,43	3,25	2,8	2,95	3,45	3,1	2,82
11	3,3	2,8	3	3,45	3,1	3,1	2,74
12	3,5	3,15	3,3	2,9	3,6	3,6	2,92
13	9,52	9,5	9,5	9,43	9,36	9,05	9,1
14	9,55	9,67	9,5	9,07	9,36	9,13	9,1
15	9,52	9,95	9,6	9,5	9,65	9,63	9,18
16	9,55	9,85	9,8	9,28	9,88	9,05	9,45
17	9,57	9,4	9,35	9,2	9,3	9,25	9,4
18	9,5	9,45	9,6	9,45	9,42	9,2	9,33
19	9,6	9,45	9,8	9,18	9,35	9,09	9,22
20	9,62	9,4	9,6	9,4	9,6	9,1	9,22
21	9,5	9,8	9,15	9,52	9,53	9,88	9,45
22	9,53	9,65	9,37	9,52	9,7	10,15	9,5
23	9,66	9,95	9,25	9,6	9,45	9,65	9,36
24	9,53	9,6	9,5	9,4	9,75	9,95	9,36
25	9,54	9,5	9,22	9,47	9,7	9,15	9,9
26	9,3	9,3	9,25	9,6	9,4	9,5	9,2

Tabela A.13 - Valores das medidas de espessuras de parede dos espécimes tipo Tê.

B Resultados experimentais

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos testes de pressão hidrostáticos.

Dutos curvados a frio



Figura B.1 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes curvos a frio, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.2 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CF3 e CF6, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o rebaixo.



Figura B.3 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CF1 e CF2, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o rebaixo.



Figura B.4 - Curva pressão - Deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CF4 e CF7 testados até a ruptura, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.5 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CF4 e CF7 testados até a ruptura, extensômetros localizados no reparo sobre o rebaixo.



Figura B.6 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime CF5 testado até a ruptura sem reparo, extensômetros no defeito.



Figura B.7 - Deformações duto fora do defeito sem reparo até a ruptura.



Figura B.8 - Espécime CF7 (ERFV) com ruptura no defeito a 308,5 bar (A). Espécime CF4 (ERFC) com ruptura fora do defeito a 320 bar (B). Espécime CF5 (sem reparo) com ruptura no defeito a 106,5 bar (C).

140,0 120,0 100,0 R1C(CQ5-ERFV) Pressão (bar) R1L(CQ5-ERFV) 80,0 R1C(CQ6-ERFV) 60,0 R1L(CQ6-ERFV) R1L(CQ1-ERFC) 40,0 R1C(CQ1-ERFC) 20.0R1L(CQ4-ERFC) 0,0 R1C(CQ4-ERFC) 200 -200 400 600 800 0 10001200 Deformação (µm/m)

Dutos curvados a quente

Figura B.9 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes curvos a quente, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.10 - Curva Pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CQ5 e CQ6, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o rebaixo.



Figura B.11 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CQ1 e CQ4, extensômetros localizados no reparo (ERFC) sobre o rebaixo.



Figura B.12 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CQ2 e CQ3 testados até a ruptura, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.13 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes CQ2 e CQ3 testados até a ruptura, extensômetros localizados no reparo sobre o rebaixo.



Figura B.14 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime CQ7 testado até a ruptura sem reparo, extensômetros no defeito.



Figura B.15 - Duto CQ3 ruptura no defeito a 297,5 bar.



Figura B.16 - Duto CQ2 ruptura fora do defeito a 370 bar (A), duto CQ7 ruptura no defeito a 50,4 bar (B).

Dutos com redução concêntrica



Figura B.17 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes com redução concêntrica, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.18 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Re4 e Re5, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o rebaixo.



Figura B.19 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Re2 e Re6, extensômetros localizados no reparo (ERFC) sobre o rebaixo.



Figura B.20 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Re1 e Re3 testados até a ruptura, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.21 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Re1 e Re3 testados até a ruptura, extensômetros localizados no reparo sobre o rebaixo.



Figura B.22 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime Re7 testado até a ruptura, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.23 - Espécime Re3 (ERFV) com ruptura fora do defeito a 276,5 bar (A). Espécime Re1 (ERFC) com ruptura fora do defeito a 284,7 bar. Espécime Re7 (sem reparo) com ruptura no defeito a 106,5 bar (C).

Dutos tipo Tê



Figura B.24 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes tipo Tê, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.25 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Tê1 e Tê3, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o rebaixo.



Figura B.26 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Tê5 e Tê6, extensômetros localizados no reparo (ERFC) sobre o rebaixo.



Figura B.27 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal dos espécimes Tê2 e Tê7 testados até a ruptura, extensômetros localizados fora do reparo.



Figura B.28 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime Tê7 testado até a ruptura, extensômetros localizados no reparo (ERFV) sobre o defeito.



Figura B.29 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime Tê2 testado até a ruptura, extensômetros localizados no reparo (ERFC) sobre o defeito.



Figura B.30 - Curva pressão - deformação circunferencial e longitudinal do espécime Tê4 testado até a ruptura sem reparo, extensômetros no defeito.



Figura B.31 - Espécime Tê7 (ERFV) com ruptura no defeito a 244,4 bar (A). Espécime Tê2 (ERFC) com ruptura no defeito a 236 bar. Espécime Tê4 (sem reparo) com ruptura no defeito a 95,6 bar (C).

C Procedimento para calcular as curvas tensão - deformação a partir de dados experimentais

A seguir é apresentado o procedimento utilizado na determinação da curva tensão deformação para o espécime Re3 confeccionado a partir do aço API 5L grau B (MAT-1), obtido mediante os resultados experimentais dos EREs circunferenciais e longitudinais.

A Tabela C.1 apresenta um resumo dos dados obtidos no ensaio de pressão hidrostática. Estes resultados de deformação circunferencial e deformação longitudinal são valores totais de deformação (incluem as deformações elásticas e plásticas).

	R1C(Re3-ERFV-276,5 Bar)	R1L(Re3-ERFV-276,5 Bar)
P(Mpa)	um/m	um/m
1,0	71	16
2,1	160	32
3,1	226	46
4,1	285	60
5,1	356	74
6,0	404	89
7,1	457	104
8,1	523	117
9,0	588	131
10,0	647	146
11,0	713	159
12,0	754	174
13,0	825	187
14,0	944	211
15,0	1146	233
15,5	1306	251
18,1	13740	867
19,5	18056	799
20,0	19832	862
22,0	28103	1194
23,5	37817	1492
24,0	41759	1603
25,1	53088	1845
26,5	91065	2169

Tabela C.1 - Resultados de deformações circunferenciais e longitudinais para o espécime Re3.

Devido a que o programa de elementos finitos trabalha com dados de deformação plástica, é necessário fazer uma separação das deformações elásticas e plásticas a partir da Tabela C.1.

A Figura C.1 apresenta as deformações circunferenciais totais para o espécime Re3. Nos pontos A e B são plotados duas retas. Uma reta paralela à seção de deformação linear (região elástica) e outra perpendicular ao eixo X. As retas paralelas representam a recuperação elástica do material (caso fosse retirada a carga). Entre a reta paralela e perpendicular identifica-se o valor de deformação elástica ($\varepsilon_{c,e}$). A deformação plástica ($\varepsilon_{c,p}$) pode ser determinada restando a deformação elástica da deformação total no ponto de estudo ($\varepsilon_{c,p} = \varepsilon_t - \varepsilon_{c,e}$). Este procedimento é repetido para cada ponto da curva pressão - deformação tanto para deformações circunferenciais totais (Figura C.1) como para as deformações longitudinais totais.



Figura C.1 - Curva pressão - deformação.

A deformação radial para a região elástica e plástica foi calculada, assim:

$$\varepsilon_{r(elástica)} = -\mu(\varepsilon_c + \varepsilon_l)$$
 C.1

$$\varepsilon_{r(plástica)} = -(\varepsilon_c + \varepsilon_l)$$
 C.2

onde $\mu = 0,3$.

A Tabela C.2 apresenta os resultados de deformações elásticas e plásticas nas direções circunferenciais, longitudinais e radiais.

Pressão	εc(μm/m)		εl(μm/m)		εr(μm/m)	
Мра	Elástico	Plástico	Elástico	Plástico	Elástica	Plástica
12,6	768,30	27,36	180,14	3,08	8,82E-04	-30,44
13,0	797,00	28,35	186,87	-0,06	9,15E-04	-28,29
13,5	827,01	45,83	193,91	-0,51	9,50E-04	-45,32
14,0	858,72	85,38	201,34	10,02	9,86E-04	-95,40
14,5	887,51	193,15	208,10	14,64	1,02E-03	-207,80
15,0	917,90	228,08	215,22	17,70	1,05E-03	-245,77
15,2	931,22	268,20	218,34	19,36	1,07E-03	-287,56
15,5	949,14	357,16	222,55	28,93	1,09E-03	-386,09
16,1	983,84	459,02	230,68	45,35	1,13E-03	-504,37
16,5	1008,89	629,92	236,55	62,23	1,16E-03	-692,15
17,0	1041,81	2734,54	244,27	67,68	1,20E-03	-2802,23
17,5	1070,98	11160,57	251,11	748,82	1,23E-03	-11909,39
18,1	1105,21	12634,50	259,14	607,87	1,27E-03	-13242,36
18,5	1131,29	13766,25	265,26	511,94	1,30E-03	-14278,19
19,0	1164,21	15336,50	272,97	492,25	1,34E-03	-15828,74
19,5	1193,95	16862,42	279,95	519,40	1,37E-03	-17381,83
20,0	1225,55	18606,17	287,36	574,26	1,41E-03	-19180,43
20,5	1255,76	20410,69	294,44	643,82	1,44E-03	-21054,52
21,0	1285,68	22601,45	301,45	726,02	1,48E-03	-23327,48
21,5	1315,41	24596,45	308,43	798,09	1,51E-03	-25394,54
22,0	1345,43	26757,42	315,46	878,47	1,54E-03	-27635,89
22,5	1376,85	29706,69	322,83	975,29	1,58E-03	-30681,98
23,0	1408,18	32697,62	330,18	1058,36	1,62E-03	-33755,98
23,5	1437,82	36379,00	337,13	1154,99	1,65E-03	-37534,00
24,0	1468,30	40291,11	344,27	1258,62	1,69E-03	-41549,73
24,5	1500,38	44973,51	351,80	1361,87	1,72E-03	-46335,38
25,1	1534,33	51554,09	359,76	1485,03	1,76E-03	-53039,12
24,9	1523,08	49677,17	357,12	1466,12	1,75E-03	-51143,29
25,3	1545,02	54268,77	362,26	1554,38	1,77E-03	-55823,14
25,8	1575,98	62105,18	369,52	1764,47	1,81E-03	-63869,65
25,8	1579,82	65414,54	370,42	1788,72	1,81E-03	-67203,26
25,9	1581,42	77501,97	370,80	1797,93	1,82E-03	-79299,90
26,5	1617,76	89447,14	379,32	1790,00	1,86E-03	-91237,14

Tabela C.2 - Deformações elásticas e plásticas para as direções circunferenciais (εc), longitudinais (εl) e radiais (εr).

A partir dos dados da Tabela C.2 pode ser determinada a deformação equivalente para valores de deformações elásticos e plásticos, assim:

$$\varepsilon_{equi-elástico} = \frac{1}{(1-\mu^2)} \sqrt{(\varepsilon_c^2 + \varepsilon_l^2 - \varepsilon_c \varepsilon_l)(1-\mu+\mu^2) + 3\mu\varepsilon_c \varepsilon_l} \qquad C.3.1$$

$$\varepsilon_{equi-plástico} = \sqrt{\frac{2}{9}} \left[(\varepsilon_c - \varepsilon_l)^2 + (\varepsilon_l - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_r)^2 \right] \qquad C.3.2$$

considerando a tensão radial σ_r igual a zero na parede externa do tubo de parede fina, as tensões totais circunferencial e longitudinal são descritas como:

$$\sigma_c = \frac{P.D}{2.t} \qquad \qquad \sigma_l = \frac{P.D}{4.t} \qquad \qquad C.4$$

A tensão total de von Mises para cada valor de pressão é dada pela equação C.5.

$$\sigma_{equi} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_l^2 + -\sigma_c \sigma_l} \qquad C.5$$

A Tabela C.3 apresenta os resultados dos cálculos realizados a partir das equações C.3.1, C.3.2, C.4 e C.5. Para estes cálculos foram utilizadas espessuras de tubo nominal de 9,6mm e diâmetros de 325 mm.

Os valores de deformações equivalentes da Tabela C.3 devem ser recalculados para obter valores de deformação real, como segue:

$$\sigma_{real} = \sigma_{equi} (1 + \varepsilon_{equi}) \qquad \varepsilon_{real} = Ln (1 + \varepsilon_{equi}) \qquad C.6$$

a Tabela C.4 apresenta os resultados das deformações equivalentes (elásticas e plásticas) e das tensões equivalentes reais.

Pressão	σc	σΙ	εequi elastica	εequi plastica	σeguiva
Мра	М	pa	m/m		Mpa
12,6	212,7	106,4	, 7,83E-04	3,35E-05	184,2
13,0	220,7	110,3	8,12E-04	3,27E-05	191,1
13,5	229,0	114,5	8,42E-04	5,26E-05	198,3
14,0	237,7	118,9	8,75E-04	1,05E-04	205,9
14,5	245,7	122,9	9,04E-04	2,32E-04	212,8
15,0	254,1	127,1	9,35E-04	2,74E-04	220,1
15,2	257,8	128,9	9,49E-04	3,21E-04	223,3
15,5	262,8	131,4	9,67E-04	4,30E-04	227,6
16,1	272,4	136,2	1,00E-03	5,58E-04	235,9
16,5	279,3	139,7	1,03E-03	7,66E-04	241,9
17,0	288,4	144,2	1,06E-03	3,20E-03	249,8
17,5	296,5	148,3	1,09E-03	1,33E-02	256,8
18,1	306,0	153,0	1,13E-03	1,50E-02	265,0
18,5	313,2	156,6	1,15E-03	1,62E-02	271,2
19,0	322,3	161,2	1,19E-03	1,80E-02	279,1
19,5	330,6	165,3	1,22E-03	1,98E-02	286,3
20,0	339,3	169,7	1,25E-03	2,18E-02	293,8
20,5	347,7	173,8	1,28E-03	2,39E-02	301,1
21,0	355,9	178,0	1,31E-03	2,65E-02	308,3
21,5	364,2	182,1	1,34E-03	2,89E-02	315,4
22,0	372,5	186,2	1,37E-03	3,14E-02	322,6
22,5	381,2	190,6	1,40E-03	3,49E-02	330,1
23,0	389,9	194,9	1,43E-03	3,84E-02	337,6
23,5	398,1	199,0	1,46E-03	4,27E-02	344,7
24,0	406,5	203,3	1,50E-03	4,73E-02	352,0
24,5	415,4	207,7	1,53E-03	5,27E-02	359,7
25,1	424,8	212,4	1,56E-03	6,04E-02	367,9
24,9	421,7	210,8	1,55E-03	5,82E-02	365,2
25,3	427,8	213,9	1,57E-03	6,36E-02	370,4
25,8	436,3	218,2	1,61E-03	7,28E-02	377,9
25,8	437,4	218,7	1,61E-03	7,66E-02	378,8
25,9	437,8	218,9	1,61E-03	9,05E-02	379,2
26,5	447,9	223,9	1,65E-03	1,04E-01	387,9

Tabela C.3 - Deformações equivalentes elásticas e plásticas, e tensões equivalentes.

	εequi	εequi		
Pressão	elástica	plástica	σ equi real	
	real			
Мра	m,	Мра		
12,6	7,82E-04	3,35E-05	184,3	
13,0	8,12E-04	3,27E-05	191,2	
13,5	8,42E-04	5,26E-05	198,4	
14,0	8,74E-04	1,05E-04	206,0	
14,5	9,04E-04	2,32E-04	212,8	
15,0	9,35E-04	2,74E-04	220,1	
15,2	9,48E-04	3,21E-04	223,3	
15,5	9,66E-04	4,30E-04	227,7	
16,1	1,00E-03	5,58E-04	236,0	
16,5	1,03E-03	7,66E-04	242,1	
17,0	1,06E-03	3,19E-03	250,6	
17,5	1,09E-03	1,33E-02	260,2	
18,1	1,13E-03	1,48E-02	268,9	
18,5	1,15E-03	1,61E-02	275,6	
19,0	1,19E-03	1,78E-02	284,1	
19,5	1,22E-03	1,96E-02	291,9	
20,0	1,25E-03	2,16E-02	300,2	
20,5	1,28E-03	2,37E-02	308,2	
21,0	1,31E-03	2,62E-02	316,3	
21,5	1,34E-03	2,85E-02	324,4	
22,0	1,37E-03	3,09E-02	332,6	
22,5	1,40E-03	3,43E-02	341,4	
23,0	1,43E-03	3,77E-02	350,3	
23,5	1,46E-03	4,18E-02	359,2	
24,0	1,49E-03	4,62E-02	368,3	
24,5	1,53E-03	5,14E-02	378,2	
25,1	1,56E-03	5,87E-02	389,5	
24,9	1,55E-03	5,66E-02	385,8	
25,3	1,57E-03	6,16E-02	393,3	
25,8	1,60E-03	7,02E-02	404,4	
25,8	1,61E-03	7,38E-02	406,7	
25,9	1,61E-03	8,67E-02	412,0	
26,5	1,65E-03	9,92E-02	426,4	

Tabela C.4 - Deformações e tensões equivalentes reais.

A Figura C.2 apresenta a curva tensão - deformação real plotada a partir dos dados da tabela Tabela C.4. Na Figura C.2 é identificada uma região de deformações elásticas e outra de deformações plásticas geradas a partir das deformações equivalentes reais elásticas e plásticas.



Figura C.2 - Curva tensão - deformação real, plotados a partir dos dados de deformações elásticas e plásticas da Tabela C.4.

Para o programa de elementos finitos são utilizados unicamente os valores de deformações plásticas. O ponto inicial para ser inserido no programa pode ser identificado a partir do ponto A da Figura C.3. Este ponto é obtido a partir da prolongação das deformações elásticas e plásticas (Figura C.3).



Figura C.3 - Curva tensão - deformação real, o ponto A identifica a interseção da prolongação das deformações elásticas e plásticas.

Finalmente são obtidos os dados a serem utilizados no programa de elementos finitos (Tabela C.5), para simular os tubos dos espécimes Re e Tê.

Donto	ε (m/m)	σ (MPa)	
POILO	equi plástica real	equi real	
1	0	244,6	
2	0,00319227	250,6	
3	0,01325228	260,2	
4	0,01484169	268,9	
5	0,01606974	275,6	
6	0,01783991	284,1	
7	0,01958471	291,9	
8	0,02158893	300,2	
9	0,02366634	308,2	
10	0,02618128	316,3	
11	0,02846436	324,4	
12	0,03093289	332,6	
13	0,03428456	341,4	
14	0,03766335	350,3	
15	0,04180326	359,2	
16	0,04618448	368,3	
17	0,05139135	378,2	
18	0,05865108	389,5	
19	0,05659504	385,8	
20	0,06164114	393,3	
21	0,07022825	404,4	
22	0,0737966	406,7	
23	0,08667982	412,0	
24	0,09924196	426,4	
25	0,7	427,0	

Tabela C.5 - Valores de deformações plásticas e tensões equivalentes reais utilizados no programa para simular o material MAT-1.

Realizando procedimentos similares podem ser obtidas as tabelas de deformações equivalentes e de tensões equivalentes reais para os materiais MAT-2, MAT-3 e MAT-4, a Tabela C.6 apresenta os dados utilizados para a simulação destes materiais.

Pontos	conexão (MAT 4)		CF (MAT 2)		CQ (MAT 3)	
	ε(m/m)	σ(MPa)	ε(m/m)	σ(MPa)	ε(m/m)	σ(MPa)
1	0	328,6	0	333,0	0	362,951937
2	0,0032	334,2	0,0066	345,5	0,00293078	378,171499
3	0,0129	343,7	0,0078	363,2	0,00332949	393,407223
4	0,0146	352,5	0,0104	376,1	0,00413644	411,863876
5	0,0159	359,2	0,0125	393,0	0,00688398	425,730799
6	0,0177	367,7	0,0159	416,9	0,01183172	443,597755
7	0,0195	375,4	0,0212	446,6	0,01514968	459,000527
8	0,0215	383,8	0,0294	469,3	0,01636591	466,532799
9	0,0236	391,8	0,0413	482,8	0,01739769	473,054572
10	0,0261	399,9	0,0503	484,5	0,01955623	483,255865
11	0,0283	407,9	0,0523	485,7	0,02238519	495,404309
12	0,0307	416,1	0,7	486,5	0,02517571	506,313194
13	0,0340	424,9			0,02740325	514,423948
14	0,0373	433,8			0,03200097	530,070282
15	0,0414	442,6			0,03894524	547,191125
16	0,0457	451,7			0,05266206	572,750681
17	0,0508	461,6			0,06223427	585,698723
18	0,0579	472,8			0,07677509	599,320445
19	0,0559	469,2			0,09736409	613,216753
20	0,0609	476,6			0,1	616
21	0,0693	487,6			0,7	617
22	0,0728	490,0				
23	0,0857	495,3				
24	0,0983	509,6				
25	0,7000	510,5				

Tabela C.6 - Valores de deformações plásticas e tensões equivalentes reais utilizados no programa para simular os materiais MAT 2, MAT 3 e MAT 4.

D Tensões em dutos curvados a quente

Nesta seção são apresentadas duas simulações em dutos curvados a quente, a fim de avaliar a equação de tensão circunferencial desenvolvida em [33] para o raio externo dos componentes de tubo curvados de paredes finas.

Para obter melhores resultados a equação B.1 pode ser reescrita com base na equação B.2 para tubos de parede grossa.



Assim pode-se obter a equação B.3 para calcular a tensão circunferencial no raio externo do componente de tubo curvado para espessuras não uniformes:

$$\sigma_{c} = \frac{2P \cdot a^{2}}{(b^{2} - a^{2})(1 - \delta sin\theta)} \left[\left(\frac{2R + \frac{D_{i}}{2}sin\theta}{2R + \frac{D_{i}}{1}sin\theta} \right) \right]$$
(B.1)

onde, P= pressão interna, a= raio intero do tubo, b= raio externo do tubo, R= raio de curvatura, Di= diâmetro do tubo e δ = é a variação máxima no intradorso e extradorso.

Componente de duto curvado com variação de espessura

Foi realizado um modelo de elementos finitos de meio componente de duto curvado com tampa (ordem de 74 mil nós e 38 mil elementos) e espessuras variáveis. A Figura D.1 apresenta o perfil de espessuras utilizada na simulação. O modelo foi realizado com um diâmetro D= 323 mm e raio de curvatura R=1056 mm.



Figura D.1 - Perfil de espessuras utilizado na simulação.

A Figura D.2 apresenta os resultados de tensões circunferenciais para o componente de tubo simulado com o perfil de espessuras da Figura D.1.



Figura D.2 - Tensões circunferencias para um componente de duto curvado (R=1056 mm) e espessura variável sob pressão de 10 MPa.

A Figura D.3, Figura D.4 e Figura D.5 apresentam as variações de tensões circunferenciais paras os pontos localizados a 90°, 180° e 270° determinados pelas soluções numéricas e analíticas.



Figura D.3 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 90 graus para um componente de duto curvado de espessura variável.



Figura D.4 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 180 graus para um componente de duto curvado de espessura variável.



Figura D.5 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 270 graus para um componente de duto curvado de espessura variável.

Foi realizada uma simulação até a ruptura com as propriedades do material MAT-2 utilizado neste trabalho para simular componentes em dutos curvados a quente.

A Figura D.6 apresenta o resultado numérico de tensão de von Misses para um componente de tubo curvado e espessura variável, o espécime atinge a ruptura a uma pressão de 35,7 MPa.



Figura D.6 - Tensão de von Mises para o componente de tubo curvado e espessura variável, a ruptura acontece a 35,7 MPa.

Componente de duto curvado com espessura constante

Foi realizado um modelo de elementos finitos de meio componente de duto curvado com tampa (ordem de 74 mil nós e 38 mil elementos). O modelo foi simulado com espessuras constante tn= 9,45 mm, diâmetro D= 323 mm e raio de curvatura R=1056 mm.

A Figura D.7 apresenta os resultados de tensões circunferenciais para o componente de tubo simulado com espessura constante tn= 9,45 mm.



Figura D.7 - Tensões circunferenciais para um componente de duto curvado (R=1056 mm) e espessura constante sob pressão de 10 MPa.

A Figura D.8, Figura D.9 e Figura D.10 apresentam as variações de tensões circunferenciais para os pontos localizados a 90°, 180° e 270° determinados pelas soluções numéricas e analíticas.



Figura D.8 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 90 graus para um componente de duto curvado de espessura constante.



Figura D.9 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 180 graus para um componente de duto curvado de espessura constante.



Figura D.10 - Tensões circunferenciais determinadas a partir do modelo numérico e equação analítica para um ponto localizado a 270 graus para um componente de duto curvado de espessura constante.

Foi realizada uma simulação até a ruptura com as propriedades do material MAT-2 utilizado neste trabalho para simular componentes em dutos curvados a quente.

A Figura D.11 apresenta o resultado numérico de tensão de von Misses para um componente de tubo curvado e espessura constante, o espécime atinge a ruptura a uma pressão de 34,3 MPa.



Figura D.11 - Tensão de von Mises para o componente de tubo curvado e espessura constante, a ruptura acontece a 34,3 MPa.

A equação analítica desenvolvida em [31] foi validada pelo modelo de elementos finitos, tanto para espécimes com espessuras variáveis como para espécimes com espessuras constantes. Esta análise foi necessária já que neste trabalho foi utilizada esta equação para construir a curva tensão - deformação dos espécimes curvados a quente, e espécimes curvados a frio.

As pressões de ruptura mostraram que a mudança de perfil de espessuras produzida pela curvatura a quente favorece levemente o aumento de resistência mecânica deste tipo de espécime. A ruptura do espécime com variação de espessura foi de 35,7 MPa no ponto localizado a 90 graus (Figura D.6) e o espécime com espessura constante atingiu a ruptura sob uma pressão de 34,3 MPa no ponto localizado a 270 graus (Figura D.11). Este comportamento é devido ao fato de que componentes de tubos curvados apresentam maiores tensões nos pontos localizados a 270 graus (Figura D.7). Assim o curvamento gera um aumento de espessura nesta região aumentando sua resistência.

E Análise de colapso plástico sobre o defeito

Nesta seção são apresentados os resultados de tensão de von Mises para o espécime Re7 simulado com defeito e sem reparo utilizando as propriedades da curva tensão deformação do material MAT 1.

Esta simulação é realizada a fim de determinar a região crítica dentro do defeito, onde possa acontecer a ruptura do espécime.

A Figura E.1 apresenta os resultados de tensão de von Mises determinados mediante modelos numéricos sob pressões internas de 3, 10 e 20,5 MPa. Na Figura E.1 as posições que apresentaram valores máximos de tensão de von Mises são indicadas mediante setas. Estas posições são:

Posição A: na superfície externa da conexão entre o canto circunferencial e o canto longitudinal do defeito.

Posição B: na superfície externa do defeito perto do canto longitudinal. Posição C: sobre o centro do defeito.



Figura E.1 - Tensão de von Mises para o espécime em redução concêntrica, sob pressão interna de 3MPa (A), 10MPa (B) e 20,5 (MPa) simulado a partir da curva tensão - deformação do material MAT 1.

Pode-se obervar que sob uma pressão de 3 MPa o ponto de maior tensão foi localizado na posição A. Sob uma pressão de 10MPA o ponto de maior tensão foi localizado na posição B. Sob uma pressão de ruptura de 20,5 MPa o ponto de

maior tensão foi localizado na posição C. Para pressões inferiores às de ruptura, as tensões de von Mises são localizadas nas posições A e B (zonas de concentração de tensões devido aos raios de arredondamento), mas sob a pressão de ruptura a tensão máxima é localizada na posição C no centro do defeito. Para um análise de colapso plástico com materiais dúcteis as regiões com mudanças geométricas devidas aos raios de arredondamento não têm relevância e assim o estudo pode ser focado na região central do defeito.