

EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM ADESIVOS E TUBOS
UTILIZADOS EM TUBULAÇÕES DE EPÓXI REFORÇADAS POR FIBRAS
DE VIDRO

MAIKON CAETANO RAMOS PESSANHA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2007

EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM ADESIVOS E TUBOS
UTILIZADOS EM TUBULAÇÕES DE EPÓXI REFORÇADAS POR FIBRAS
DE VIDRO

MAIKON CAETANO RAMOS PESSANHA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para a
obtenção de título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

Co-orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

34/2007

Pessanha, Maikon Caetano Ramos

Efeito da variação de temperatura em adesivos e tubos utilizados em tubulações de epóxi reforçadas por fibras de vidro / Maikon Caetano Ramos Pessanha. – Campos dos Goytacazes, 2007.

xviii, 161 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

Orientador: Dylmar Penteado Dias.

Co-orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Estruturas

Bibliografia: f. 123-127

1. Adesivos 2. Ensaio hidrostático 3. Indústria do petróleo 4. PRFV 5. Temperatura I. Universidade Estadual do Norte

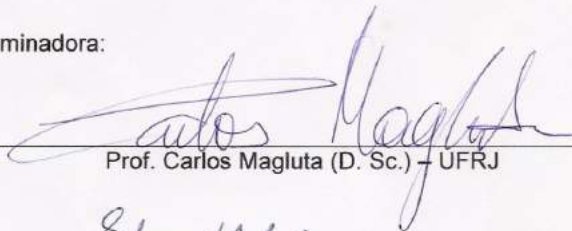
EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM ADESIVOS E TUBOS
UTILIZADOS EM TUBULAÇÕES DE EPÓXI REFORÇADAS POR FIBRAS
DE VIDRO

MAIKON CAETANO RAMOS PESSANHA

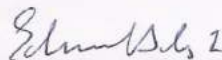
Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências para a
obtenção de título de Mestre em
Engenharia Civil.

Aprovada em 18 de Setembro de 2007.

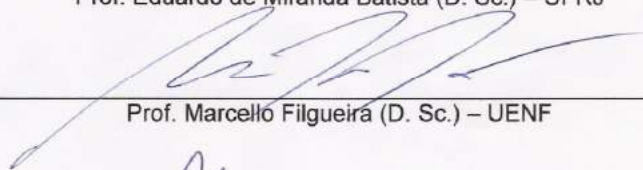
Comissão Examinadora:



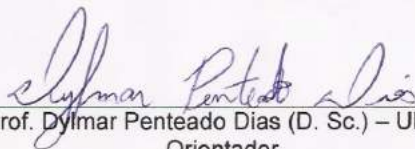
Prof. Carlos Magluta (D. Sc.) – UFRJ



Prof. Eduardo de Miranda Batista (D. Sc.) – UFRJ



Prof. Marcelo Filgueira (D. Sc.) – UENF



Prof. Dylmar Penteado Dias (D. Sc.) – UENF
Orientador

Dedicatória

À Deus, pela sua presença constante em minha vida, me ensinando e indicando o caminho correto a percorrer.

À minha família, em especial às minhas avós Durvalina (*in memoriam*) e Rita (*in memoriam*), exemplos de mulheres batalhadoras durante toda a vida, aos meus pais Aloísio e Romirte que sempre foram exemplos de dedicação e carinho, transmitindo as mais belas qualidades que um ser humano deve possuir, são elas: amor, caráter e honestidade. Ao meu irmão Márlon pelo seu grande exemplo de dedicação e insistência em todos os seus projetos de vida, além do grande auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

À minha madrinha Rita de Cássia pela sua intensa demonstração de alegria e otimismo, mesmo frente a diversas artimanhas da vida.

Ao meu padrinho Sebastião pelo seu exemplo de como um engenheiro deve se portar como profissional, além dos seus grandiosos conselhos.

Porque na muita sabedoria há muito enfado;
e o que aumenta em ciência,
aumenta em trabalho.

Eclesiastes 1:18

Agradecimentos

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

À PETROBRAS, na figura do engenheiro Otávio Lamas de Farias, pelo apoio financeiro no desenvolvimento do projeto.

À EDRA DO BRASIL, na pessoa do engenheiro Arnaldo Gatto, pelo apoio na concessão de materiais para execução dos ensaios e pelas informações concedidas.

À bolsista Ana Beatriz, pelo auxílio na confecção de corpos-de-prova e execução dos ensaios de tração uniaxial de adesivos, além de seu enorme bom humor em fazer estas tarefas extremamente entediantes.

Ao professor do LAMAV/UENF Eduardo Atem de Carvalho, pela ajuda na utilização da máquina universal de ensaios INSTRON e ao bolsista Vitor pelo auxílio na execução dos ensaios de tração uniaxial de adesivos neste equipamento.

Ao professor do LAMAV/UENF Marcello Filgueira, pela grande contribuição e sugestões nos ensaios de caracterização de materiais e nos ensaios de tração dos adesivos.

A todos os professores do LECIV/UENF, em especial, Sergio Luis, Sérgio Tibana, Jonas Alexandre e Jean Marie pelas sugestões durante o mestrado no que tange aos diversos projetos de pesquisa que me envolvi.

Ao professor do LECIV/UENF Paulo Maia, pelas sugestões para a confecção do equipamento de ensaios hidrostáticos com variação de temperatura.

Ao Prof. Ronaldo Paranhos pela co-orientação durante o desenvolvimento da dissertação.

Ao Prof. Dylmar Penteado Dias pelo companheirismo e orientação desde os tempos de iniciação científica até o mestrado, além de seu grande bom humor frente aos diversos contratempos que ocorreram durante a pesquisa.

Aos bolsistas Fabrício e Rodrigo pelo auxílio na execução dos ensaios hidrostáticos.

Ao engenheiro Marcelo Leite da FLUTROL, pelo auxílio na aquisição da bomba para os ensaios hidrostáticos e ainda por dirimir dúvidas em relação ao desenvolvimento desse sistema.

A Cristina Ferrari da FUNDENOR, pela grande ajuda na aquisição de materiais para a viabilidade da pesquisa.

Aos pesquisadores do LCFIS/UENF Israel Esquef e Márlon Pessanha (este, antes de pesquisador, meu irmão), pelo auxílio no desenvolvimento de todo o sistema de aquisição de dados do equipamento de ensaios hidrostáticos.

Aos técnicos do LECIV/UENF Milton, André e Vanuzia, pelo auxílio durante os anos que passei na Universidade, desde os tempos de iniciação científica. Ao técnico do LAMAV/UENF Carlan por estar sempre disponível em ajudar.

Aos colegas de mestrado e de laboratório Marcos Vinícios, Leonardo Pedroti, os “*primos*” Francisco e Alessandro, Gisele, Fabrícia, Adilson “*Juiz*”, Khaled vulgo “*Alexandre*”, Jean Crispim, Rennan, Joadelio, Carol Espinosa, Carol Lannes e Gabriel.

Aos meus amigos Aline Pinheiro, Larissa Curty, Cristiano Miller e Ana Laura pelo grande companheirismo.

Às Leis de Murphy que sempre me apresentaram algum desafio para o meu engrandecimento profissional e humano.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Índice

Lista de Figuras.....	III
Lista de Tabelas.....	XI
Lista de Abreviaturas e Siglas	XV
Resumo	XVII
Abstract	XVIII
1. Introdução	1
1.1 Compósitos.....	2
1.2 Fase dispersa	2
1.3 Fase matriz	5
1.4 Compósitos de matriz polimérica (CMP)	10
1.4.1 Tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV).....	10
1.4.2 Juntas em tubulações de PRFV.....	14
1.4.3 Modo de falha em sistemas de tubulações de PRFV.....	16
1.4.4 Especificações técnicas em tubulações de PRFV	19
1.5 Alguns estudos da literatura sobre CMPs.....	21
1.6 Objetivos e justificativas	25
2. Programa experimental	27
2.1 Materiais	27
2.1.1 Tubos e conexões.....	27
2.1.2 Adesivos	33
2.2 Métodos.....	34
2.2.1 Caracterização de tubos e adesivos	35
2.2.1.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (<i>FTIR</i>)	36
2.2.1.2 Análise termogravimétrica (<i>TGA</i>)	36
2.2.1.3 Análise termodinâmico-mecânica (<i>DMTA</i>)	37
2.2.1.4 Temperatura de amolecimento de Vicat.....	38
2.2.2 Ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura.....	38
2.2.3 Ensaios hidrostáticos com variação de temperatura.....	44
2.2.3.1 Equipamento de ensaios hidrostáticos	44
2.2.3.2 Instrumentação e aquisição de dados.....	51

2.2.3.3	Desenvolvimento dos ensaios hidrostáticos.....	57
3.	Resultados e discussões.....	66
3.1	Caracterização de tubos e adesivos.....	66
3.1.1	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (<i>FTIR</i>).....	66
3.1.2	Análise termogravimétrica (<i>TGA</i>).....	77
3.1.3	Análise termodinâmico-mecânica (<i>DMTA</i>).....	83
3.1.4	Temperatura de amolecimento de Vicat	85
3.2	Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura	86
3.3	Ensaio hidrostático com variação de temperatura	92
3.3.1	Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em juntas coladas de tubulações de PRFV	93
3.3.2	Monitoramento e estimativa de temperatura nos corpos-de-prova.....	96
3.3.3	Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova	101
3.3.4	Deslocamentos e deformações nas juntas dos corpos-de-prova.....	106
3.3.5	Superfície de ruptura dos corpos-de-prova.....	114
4.	Conclusões	120
5.	Sugestões para trabalhos	122
6.	Referências bibliográficas	123
	Apêndice I – Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura nos adesivos	128
	Apêndice II – Roteiro de realização dos ensaios hidrostáticos com variação de temperatura.....	135
	Apêndice III – Curvas de monitoramento e estimativa de temperatura nos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos.....	141
	Apêndice IV – Curvas de monitoramento de pressão hidrostática nos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos.....	147
	Apêndice V – Curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos.....	154

Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura molecular do vidro (Chawla, 1998).	3
Figura 2 – Esquema de fabricação de fibras de vidro (adaptado de Chawla, 1998).	4
Figura 3 – Formas de comercialização de fibras de vidro.	5
Figura 4 – Volume específico <i>versus</i> temperatura de um polímero amorfo e outro semicristalino (adaptado de Chawla, 1998).	8
Figura 5 – Fórmula estrutural de resina epoxídica (Wright, 2004).....	9
Figura 6 – Padrão de enrolamento em tubo de laminação simétrica submetido à pressão interna.....	11
Figura 7 – Tubulação de PRFV em plataforma <i>offshore</i> (Ameron International, 2006)..	14
Figura 8 – Tipos de juntas em tubulações de PRFV (adaptado de Gibson, 2003).....	15
Figura 9 – (a) delaminação; (b) falha de suporte (Farias e Balbi, 2004).	18
Figura 10 – (a) <i>blooming</i> no tubo; (b) <i>bloming</i> na junta (Farias e Balbi, 2004).....	18
Figura 11 – (a) falha na junta; (b) vazios no adesivo (Farias e Balbi, 2004).	18
Figura 12 – Prescrições necessárias para o ensaio <i>split disk method</i> (adaptado de ASTM D 2290, 2004).....	20
Figura 13 – Esquema do ensaio de deflexão em tubulações de PRFV (adaptado de ASTM D 2925, 2001).....	21
Figura 14 – Junta colada tipo <i>taper/taper</i> de PRFV para tubulação de 100 mm de diâmetro (adaptado de Knox <i>et al.</i> , 2001).	23
Figura 15 – Distribuição de tensões cisalhantes e de clivagem da junta em função da distância ao nariz da junta, isto é, zona 3 (adaptado de Knox <i>et al.</i> , 2001).	23
Figura 16 – Efeito da posição do defeito nas tensões principais (adaptado de Knox <i>et al.</i> , 2001).	24
Figura 17 – Deslocamento de fluência numérico (f.e.) e experimental de tubulações PRFV com juntas <i>taper/taper</i> a 90°C (adaptado de Knox <i>et al.</i> , 2001).	24
Figura 18 – Luva tipo <i>quick-lock</i> para sistemas de PRFV série 7000M proveniente do fabricante internacional (Ameron International, 2006).....	29
Figura 19 – Flange tipo <i>heavy-duty</i> para sistemas de PRFV série 7000M proveniente do fabricante internacional (Ameron International, 2006).....	30

Figura 20 – Luva para sistemas de PRFV proveniente do fabricante nacional (Edra do Brasil, 2006a).	32
Figura 21 – Flange para sistemas de PRFV proveniente do fabricante nacional (Edra do Brasil, 2006a).	32
Figura 22 – Moldes para a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de tração uniaxial em adesivos com variação de temperatura.....	39
Figura 23 – Corpo-de-prova de adesivo para os ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura.	39
Figura 24 – Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura: (a) forno resistivo acoplado; (b) detalhe do forno.....	40
Figura 25 – Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura: (a) detalhe da manta térmica; (b) detalhe da ruptura no entalhe.....	41
Figura 26 – Exemplo de obtenção do módulo elástico (E) e da tensão de escoamento (σ_{esc}) em no trecho inicial da curva σ - ε do corpo de prova CP2A25.....	43
Figura 27 – Vista panorâmica do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.	45
Figura 28 – Diagrama do equipamento de ensaio hidrostático.	46
Figura 29 – Legenda A do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.	47
Figura 30 – Legenda B do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.	48
Figura 31 – Bomba centrífuga elétrica e <i>SKID</i> de ensaio hidrostático.	49
Figura 32 – Esquema do <i>SKID</i> de ensaio hidrostático (adaptado de Edra do Brasil, 2006b).	50
Figura 33 – Reservatório montado e envolto com manta isolante de fibra de vidro e compressor de ar comprimido.	51
Figura 34 – Esquema da caixa coletora de canais e placa de aquisição de dados (PAD8).	54
Figura 35 – Detalhe do dispositivo de controle da bomba centrífuga elétrica (DBCE). ...	54
Figura 36 – Detalhe do dispositivo de controle da resistência elétrica (DRT).	55
Figura 37 – <i>Software</i> de leitura dos <i>LVDTs</i>	56
Figura 38 – <i>Software</i> de sensoriamento de dados.	56

Figura 39 – Corpos-de-prova nacionais para ensaio hidrostático: (a) junta colada e (b) junta laminada.....	57
Figura 40 – Detalhe da união intermediária dos corpos-de-prova nacionais: (a) juntas coladas e (b) juntas laminadas.....	58
Figura 41 – Detalhe da união flange-tubo das juntas coladas no produto nacional.	58
Figura 42 – Detalhe da união flange-tubo das juntas laminadas do produto nacional. ..	59
Figura 43 – (a) Corpo-de-prova importado com junta colada e (b) detalhe da junta colada luva-tubo.....	59
Figura 44 – Detalhe da junta colada flange-tubo do corpo-de-prova importado.....	60
Figura 45 – Flanges cegos de aço com orifício central para passagem de água.....	60
Figura 46 – Corpo-de-prova no suporte de saturação.....	61
Figura 47 – Fixação dos <i>LVDTs</i> no corpo-de-prova.....	61
Figura 48 – Disposição dos transdutores de deslocamento (<i>LVDTs</i>) e do transdutor de contato de temperatura (TCT) – vista superior (medidas em cm).	62
Figura 49 – Disposição dos transdutores de deslocamento (<i>LVDTs</i>) e do transdutor de contato de temperatura (TCT) – vista frontal.....	62
Figura 50 – Disposição dos transdutores intermediários de deslocamento (<i>LVDTs</i> 2 e 3) nos corpos-de-prova laminados.	62
Figura 51 – Posicionamento do TCT e detalhe da utilização de pasta térmica.....	63
Figura 52 – Posicionamento do TCTA no corpo-de-prova e detalhe da utilização de pasta térmica.....	63
Figura 53 – Estimativa de tempo de estabilização de temperatura na parede de um setor de tubo de PRFV do fabricante nacional.	64
Figura 54 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPEA e um similar de resina bisfenol A.....	67
Figura 55 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPEB.....	68
Figura 56 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE40A60B (material raspado e produto de pirólise).....	69
Figura 57 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE50A50B (material raspado e produto de pirólise).....	69
Figura 58 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE60A40B (material raspado e produto de pirólise).....	70

Figura 59 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPET (material raspado e produto de pirólise) e substâncias similares de banco de dados.	71
Figura 60 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAA e um similar de resina bisfenol A.....	72
Figura 61 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAB e um similar ciclohexilamina.	73
Figura 62 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA40A60B (material raspado e produto de pirólise).....	74
Figura 63 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA50A50B (material raspado e produto de pirólise).....	75
Figura 64 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA60A40B (material raspado e produto de pirólise).....	75
Figura 65 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAT (material raspado e produto de pirólise) e substâncias similares de banco de dados.	76
Figura 66 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPEA; (b) CPEB.	78
Figura 67 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPE40A60B; (b) CPE60A40B.....	79
Figura 68 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPE50A50B; (b) CPET.	79
Figura 69 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPAA; (b) CPAB.	81
Figura 70 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPA40A60B; (b) CPA50A50B.....	82
Figura 71 – Curvas <i>TGA</i> e <i>DTG</i> das amostras: (a) CPA60A40B; (b) CPAT.	82
Figura 72 – <i>DMTA</i> para as amostras CPET, CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B: (a) curvas G' ; (b) curvas $\tan \delta$ (G''/G').	83
Figura 73 – <i>DMTA</i> das amostras CPAT, CPA40A60B, CPA60A40B e CPA50A50B: (a) curvas G' ; (b) curvas $\tan \delta$ (G''/G').....	84
Figura 74 – Variação da tensão de escoamento dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.	90
Figura 75 – Variação da deformação de escoamento dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.	90
Figura 76 – Variação da tensão de ruptura dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.	91
Figura 77 – Variação da deformação de ruptura dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.	91

Figura 78 – Variação do módulo elástico dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.	92
Figura 79 – Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em tubulações de PRFV do fabricante nacional.....	94
Figura 80 – Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em tubulações de PRFV do fabricante internacional.....	96
Figura 81 – Monitoramento de temperaturas TR, TFLA, TIT e TFT no corpo-de-prova CPE1L85.....	100
Figura 82 – Monitoramento de temperaturas TR, TFLA, TIT e TFT no corpo-de-prova CPE1LAMB.	101
Figura 83 – Ruptura do corpo-de-prova CPE1C85.	114
Figura 84 – Superfície de ruptura do corpo-de-prova CPE1C85.....	115
Figura 85 – Superfície de ruptura da luva do corpo-de-prova CPE1C85.	116
Figura 86 – Superfície de ruptura da luva do corpo-de-prova CPE1C85.	116
Figura 87 – Região de ruptura do corpo-de-prova CPE2C85.	117
Figura 88 – Presença de vazios na região fraturada do corpo-de-prova CPE2C85.....	117
Figura 89 – Região de ruptura do corpo-de-prova CPE3C85.	118
Figura 90 – Caminho de fissuração na região fraturada do corpo-de-prova CPE3C85.	118
Figura 91 – Vazamento no laminado do corpo-de-prova CPE1L85.	119
Figura 92 – Delaminação do flange no corpo-de-prova CPA1C85.....	119
Figura 93 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 25°C.....	128
Figura 94 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 55°C.....	129
Figura 95 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 85°C.....	129
Figura 96 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 115°C.....	130
Figura 97 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 25°C.....	130
Figura 98 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 55°C.....	131
Figura 99 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 85°C.....	131
Figura 100 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 115°C.....	132
Figura 101 – Detalhes de fixação de cabo de sustentação e da conexão do transdutor de pressão e temperatura (TPT) no corpo-de-prova.	135

Figura 102 – Coletor drenante geral e detalhes da válvula agulha do dreno de saturação (DS), da válvula esfera do dreno ladrão (DL) e da válvula esfera da caixa (VC).	136
Figura 103 – (a) Detalhe da válvula esfera do dreno de fundo (DF) e (b) detalhe da válvula esfera de abastecimento do reservatório térmico (VA) e da válvula agulha controladora de pressão (VCP).	136
Figura 104 – <i>SKID</i> de ensaio hidrostático (a) Detalhe do ponto de escorva (PE) e da válvula VEB-1 e (b) detalhe da válvula VA-1.	137
Figura 105 – Deposição do corpo-de-prova no suporte horizontal.	138
Figura 106 – Deposição da caixa protetora do corpo-de-prova.	139
Figura 107 – Detalhe do filtro regulador de ar comprimido (FR-1), válvula de bloqueio de ar (VEA-1) e manômetro de ar comprimido (MA-1).	140
Figura 108 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE1C85.	141
Figura 109 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE2C85.	141
Figura 110 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE3C85.	142
Figura 111 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE4C85.	142
Figura 112 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE1CAMB.	143
Figura 113 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE2CAMB.	143
Figura 114 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE3CAMB.	143
Figura 115 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA1C85.	144
Figura 116 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA2C85.	144
Figura 117 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA3C85.	145

Figura 118 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA1CAMB.....	145
Figura 119 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA2CAMB.....	146
Figura 120 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA3CAMB.....	146
Figura 121 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1C85. ..	147
Figura 122 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE2C85. ..	147
Figura 123 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE3C85. ..	148
Figura 124 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE4C85. ..	148
Figura 125 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1CAMB.	149
Figura 126 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE2CAMB.	149
Figura 127 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE3CAMB.	149
Figura 128 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1L85.	150
Figura 129 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1LAMB.	150
Figura 130 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA1C85.	151
Figura 131 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA2C85.	151
Figura 132 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA3C85.	151
Figura 133 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA1CAMB.	152
Figura 134 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA2CAMB.	152
Figura 135 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA3CAMB.	153

Figura 136 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1C85.	154
Figura 137 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE2C85.	154
Figura 138 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3C85.	155
Figura 139 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3C85.	155
Figura 140 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1CAMB.	156
Figura 141 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE2CAMB.	156
Figura 142 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3CAMB.	157
Figura 143 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1L85.	157
Figura 144 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1LAMB.	158
Figura 145 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA1C85.	158
Figura 146 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA2C85.	159
Figura 147 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA3C85.	159
Figura 148 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA1CAMB.	160
Figura 149 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA2CAMB.	160
Figura 150 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA3CAMB.	161

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparativo de propriedades de tubulações utilizadas na indústria (adaptado de Salibi, 2001).	13
Tabela 2 – Defeitos em tubulações e juntas de PRFV e técnicas apropriadas de ensaios não-destrutivos (The Norwegian Oil Industry Association, 1997).	17
Tabela 3 – Dimensões de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	28
Tabela 4 – Propriedades físicas de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	28
Tabela 5 – Propriedades mecânicas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	28
Tabela 6 – Pressão de colapso de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	29
Tabela 7 – Dimensões de luvas tipo <i>quick-lock</i> do sistema de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	29
Tabela 8 – Dimensões de flanges tipo <i>heavy-duty</i> do sistema de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	30
Tabela 9 – Rigidez e distância máxima entre apoios ($L_{máx}$) de tubos de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).	31
Tabela 10 – Coeficiente de correção de vão em função da temperatura de operação de tubos e conexões de PRFV para classe de pressão do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).	31
Tabela 11 – Dimensões e massa linear dos tubos de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).	31
Tabela 12 – Dimensões de luvas do sistema de tubulações de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).	32
Tabela 13 – Dimensões de flanges do sistema de tubulações de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).	33
Tabela 14 – Tempo de aplicação do adesivo RP-60B com a temperatura ambiente para sistemas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	33

Tabela 15 – Tempo de aplicação, tempo de cura e de mobilidade do adesivo PSX-60 em função da temperatura ambiente para sistemas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).	34
Tabela 16 – Nomenclatura das amostras analisadas.....	35
Tabela 17 – Nomenclatura das amostras analisadas.....	43
Tabela 18 – Algumas especificações de sensores de temperatura segundo fabricante (adaptado de Sensoray, 1999).	52
Tabela 19 – Nomenclatura dos corpos-de-prova.	65
Tabela 20 – Temperatura de amolecimento de Vicat média (T_{vm}) para carregamento de $50 \pm 1,0$ N e $120 \pm 10^{\circ}\text{C/h}$ para o caso do produto nacional.	86
Tabela 21 – Temperatura de amolecimento de Vicat média (T_{vm}) para carregamento de $50 \pm 1,0$ N e $120 \pm 10^{\circ}\text{C/h}$ para o caso do produto importado.	86
Tabela 22 – Temperaturas médias com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL de corpos-de-prova nacionais e importados a 85°C	96
Tabela 23 – Temperaturas com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C	97
Tabela 24 – Temperaturas com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C	97
Tabela 25 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C	98
Tabela 26 – Perda térmica nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C	98
Tabela 27 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C	99
Tabela 28 – Perda térmica nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C	99
Tabela 29 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.	99
Tabela 30 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	99
Tabela 31 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C	102

Tabela 32 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.....	103
Tabela 33 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova laminados.....	104
Tabela 34 – Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	104
Tabela 35 – Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	105
Tabela 36 – Deslocamentos monitorados nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C. ...	107
Tabela 37 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.	107
Tabela 38 – Deslocamentos monitorados nas juntas no momento da ruptura nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.....	108
Tabela 39 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas no momento da ruptura nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C. .	108
Tabela 40 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.....	109
Tabela 41 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.....	109
Tabela 42 – Deslocamentos monitorados nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.....	109
Tabela 43 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.....	109
Tabela 44 – Máximos deslocamentos nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova nacionais laminados.....	110
Tabela 45 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais laminados.....	110
Tabela 46 – Deslocamentos monitorados nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais laminados.....	110

Tabela 47 – Deslocamentos monitorados nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.....	111
Tabela 48 – Deformações calculadas nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	111
Tabela 49 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	111
Tabela 50 – Deformações calculadas nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	111
Tabela 51 – Deslocamentos monitorados nas juntas ao final dos ensaios dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	112
Tabela 52 – Deformações calculadas nas juntas ao final dos ensaios dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.	112
Tabela 53 – Deslocamentos monitorados nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	113
Tabela 54 – Deformações calculadas nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	113
Tabela 55 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	113
Tabela 56 – Deformações calculadas nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova colados importados submetidos a temperatura ambiente.	114
Tabela 57 – Deslocamentos monitorados nas juntas ao final dos ensaios nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	114
Tabela 58 – Deformações calculadas nas juntas ao final dos ensaios nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.	114
Tabela 59 – Resumo das propriedades mecânicas do adesivo nacional.....	133
Tabela 60 – Resumo das propriedades mecânicas do adesivo importado.	134

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>apud</i>	<i>Citado por</i>
<i>API</i>	<i>American Petroleum Institute</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>CCDM</i>	<i>Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais</i>
<i>CMP</i>	<i>Compósito de Matriz Polimérica</i>
<i>CPVC</i>	<i>Policloreto de vinila clorado</i>
<i>DETA</i>	<i>Dietilenotriamina</i>
<i>DGEBA</i>	<i>Éter diglicidil de bisfenol A</i>
<i>DMTA</i>	<i>Análise termodinâmico-mecânica</i>
<i>DTG</i>	<i>Termogravimetria derivativa</i>
<i>DSC</i>	<i>Calorimetria diferencial exploratória</i>
<i>et al.</i>	<i>E outros autores</i>
<i>FTIR</i>	<i>Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier</i>
<i>GRE</i>	<i>Glassfiber Reinforced Epoxy</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LAMAV</i>	<i>Laboratório de Materiais Avançados da UENF</i>
<i>LCFIS</i>	<i>Laboratório de Ciências Físicas da UENF</i>
<i>LECIV</i>	<i>Laboratório de Engenharia Civil da UENF</i>
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
<i>PET</i>	<i>Poli-tereftalato de etileno</i>
<i>PMMA</i>	<i>Polimetacrilato de vinila</i>
<i>PMS</i>	<i>Pressão Máxima de Serviço</i>
<i>PN</i>	<i>Pressão Nominal</i>
<i>pol</i>	<i>Polegadas</i>
<i>Proc.</i>	<i>Procedimento</i>
<i>PRFV</i>	<i>Plástico Reforçado por Fibras de Vidro</i>
<i>PVAc</i>	<i>Poliacetato de vinila</i>

<i>PVC</i>	<i>Policloreto de Vinila</i>
<i>SBR</i>	<i>Borracha de estireno-butadieno</i>
<i>TGA</i>	<i>Análise termogravimétrica</i>
<i>TMA</i>	<i>Análise termomecânica</i>
<i>UENF</i>	<i>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro</i>
<i>UFSCar</i>	<i>Universidade Federal de São Carlos</i>
<i>Unid.</i>	<i>Unidade</i>

Resumo

A utilização de tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV) em plataformas *offshore* teve início com a proeminente necessidade de materiais mais leves e resistentes à corrosão. Tais tubulações são utilizadas tanto em plataformas de perfuração quanto de produção de petróleo, além de sistemas de tratamento de efluentes. As juntas em tubulações de PRFV podem ser coladas, laminadas ou ainda mecânicas. Tem-se notícia de que no Brasil estas tubulações trabalham a temperaturas de 85°C com transientes térmicos de até 115°C. Em plataformas *offshore* na Bacia de Campos foram encontradas, nas tubulações de PRFV, as seguintes falhas: delaminação, *blooming*, rupturas de juntas coladas e defeitos de suportaço. Frente aos inúmeros tipos de falhas encontradas nas juntas coladas de tubulações de PRFV, este trabalho buscou inicialmente caracterizar adesivos e tubos utilizados nestes tipos de juntas por meio de identificação química, degradação térmica e desempenho termomecânico. Além disso, como a grande frequência de falha neste sistema tem sido nas juntas tubo-adesivo, pretendeu-se também avaliar o comportamento do adesivo por meio de ensaios de tração direta e o comportamento da junta colada por meio de ensaios hidrostáticos. Para tanto foi desenvolvido um equipamento de ensaios hidrostáticos que simulasse as condições encontradas *in loco*, ou seja, pressões e temperaturas de até 85°C, visto que não existe na literatura estudo deste tipo. Desta forma, no presente trabalho foi verificado que a introdução da temperatura indicou queda de desempenho mecânico em algumas juntas coladas, sendo que estas ainda apresentaram deformações excessivas mesmo antes de atingirem a ruptura. Além disso, deve-se destacar que a utilização da ASTM D 1599 (2005) para qualificar juntas coladas para aplicação no Brasil não é eficaz, visto que estas tubulações trabalham a temperaturas da ordem de 85°C e a referida norma não considera este parâmetro.

Abstract

The utilization of glass fiber reinforced plastic pipes (GFRP) in offshore platforms had started with the prominent need of lighter and resistant materials to the corrosion. Such piping is used so much in drilling platforms as of production of petroleum, besides systems of effluent treatments. The pipe joints in GFRP can be adhesively, laminated or mechanics. In Brazil these piping work to temperatures at 85°C with thermal transient up to 115°C. In Campos Basin offshore platforms were found, in GFRP pipes, the following flaws: delamination, blooming, ruptures of adhesively joints and support defects. Front to the several flaws types found in the adhesively joints of GFRP piping, this work looked for initially to characterize adhesives and pipes used in these joints types through chemical identification, thermal degradation and thermo-mechanical performance. Besides, as the great flaw frequency on this system has been in the pipe-adhesive joints, it was also intended to evaluate the performance of the adhesive through tensile tests and the behavior of the system adhesively joints through hydrostatic tests.

It was developed an equipment of hydrostatic tests to simulate the conditions found in service, in other words, pressures and high temperatures (up to 85°C), because there is not in the literature study of this type. Therefore, in the present work the introduction of the temperature was verified indicated reduction of mechanical performance in some adhesively joints, and these still presented excessive deformations even before they reached the rupture. Besides, the use of ASTM D 1599 (2005) to qualify adhesively joints for application in Brazil is not effective, because these piping work to temperatures at 85°C and that code does not consider this parameter.

1. Introdução

A utilização de tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV) na indústria do petróleo se deve ao fato de que estes materiais possuem elevadas resistência específica e à corrosão em ambientes salinos.

Estudos em tubulações de PRFV em diversas plataformas marítimas da Petrobras têm encontrado uma diversidade de defeitos, sendo que grande parte dos vazamentos verificados, ocorreram nas juntas destes materiais. Desta forma os diversos métodos de inspeção têm focado especificamente nas juntas coladas de tubulações de PRFV, pois estas são as mais utilizadas.

As especificações técnicas empregadas para qualificar este material utilizam somente pressão como parâmetro. No entanto, tem-se verificado temperaturas de serviço da ordem de 85°C com transientes térmicos de até 115°C.

Este trabalho teve o intuito de avaliar o efeito de temperatura em adesivos e tubos utilizados em tubulações de PRFV buscando identificar quimicamente e avaliar o desempenho mecânico dos materiais envolvidos, introduzindo temperatura como principal variável, visto que não existe na literatura estudo deste tipo.

Desta forma, inicialmente é apresentada uma visão geral de compósitos, além das fases presentes (fibra e matriz), destacando aquelas que foram objeto de estudo, isto é, tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV). Neste contexto são apresentados os diversos tipos de falhas encontradas nestas tubulações, dando especial atenção àquelas verificadas nas juntas coladas.

Em seguida são apresentadas algumas especificações técnicas para qualificação e dimensionamento destas tubulações, bem como alguns estudos da literatura abordando compósitos de matriz polimérica.

No capítulo referente ao programa experimental são detalhados os materiais envolvidos, bem como a metodologia dos ensaios utilizados, a saber: caracterização de tubos e adesivos para a identificação química e degradação termomecânica destes, ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura em adesivos para avaliação do desempenho termomecânico dos mesmos e ensaios hidrostáticos com variação de temperatura em juntas coladas estudando o desempenho termomecânico destas, simulando as condições encontradas *in loco*.

Nos capítulos seguintes são apresentados os resultados das análises e ensaios, além da discussão destes, conclusões gerais, sugestões para trabalhos e referências bibliográficas utilizadas.

1.1 Compósitos

Os compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, sendo seus componentes combinados a nível macroscópico e não solúveis entre si (Mano, 1991). Um dos constituintes é responsável pela impregnação do reforço, conhecido como fase matriz, e o outro é denominado de fase reforço ou dispersa. Por outro lado, a matriz geralmente é um material contínuo. O material utilizado no reforço pode estar na forma de fibras curtas ou contínuas, *whiskers* e partículas (Callister, 2000, Chawla, 1998).

1.2 Fase dispersa

Em sua maioria, os reforços de compósito são encontrados na forma de fibras devido à maior resistência e rigidez que esta forma proporciona (Callister, 2000; Chawla, 1998). A utilização de fibras como materiais de reforço é baseada em três pilares principais (Dresher, 1969 *apud* Chawla, 1998), onde o primeiro refere-se ao efeito de tamanho que está relacionado à probabilidade de ocorrência de defeitos na superfície da fibra, sendo esta diretamente proporcional ao diâmetro do reforço. O segundo pilar seria a razão de aspecto, isto é, a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra. Quanto maior a razão de aspecto, mais rígido e resistente será o reforço devido à facilidade de transferência de solicitação entre as fases.

O terceiro pilar é o grau de flexibilidade que está relacionado ao módulo de elasticidade e ao diâmetro do reforço. O grau de flexibilidade é muito mais suscetível ao diâmetro do reforço do que ao seu módulo. Sendo assim, quanto menor o diâmetro da fibra maior será a sua flexibilidade, mesmo que tenha um módulo de elasticidade elevado. Pode-se dizer então que uma maior flexibilidade facilita os processos de confecção dos compósitos.

Dentre os diversos tipos de reforço destacam-se as fibras de vidro, as poliméricas, além das fibras vegetais e metálicas. Tem-se notícia de vasos e ânforas reforçadas por fibras de vidro encontrados em túmulos de faraós (Saint-Gobain, 2006). Para aplicações mais nobres destacam-se as fibras avançadas de boro, de carbono, de carbetto de silício e de alumina, que combinam baixa densidade com alta resistência e rigidez (Chawla, 1998).

Em geral as fibras de vidro apresentam propriedades mecânicas satisfatórias, como resistência a tração (1750 MPa) e módulo de elasticidade (70 GPa), combinadas com isolamento termoelétrico, baixa densidade além de baixo custo (Chawla, 1998, Saint-Gobain, 2006).

Ainda segundo Chawla (1998), a composição química das fibras de vidro é basicamente de óxidos possuindo maior quantidade de sílica (SiO_2). A Figura 1 apresenta a estrutura molecular da fibra de vidro, onde percebe-se a predominância de poliedros de ligações covalentes Si-O, bem como o alto grau de amorfismo presente. No processo de fabricação das fibras de vidro, seriam necessárias altas temperaturas para quebrar tais ligações; sendo assim, é utilizado como adição alguns óxidos metálicos (Na_2O , por exemplo). Estes íons metálicos se ligam ionicamente à estrutura, mas não prejudicam o amorfismo característico, desde que não esteja em excesso. Pode-se visualizar claramente a isotropia da estrutura molecular do vidro, que influenciará nas propriedades do produto final.

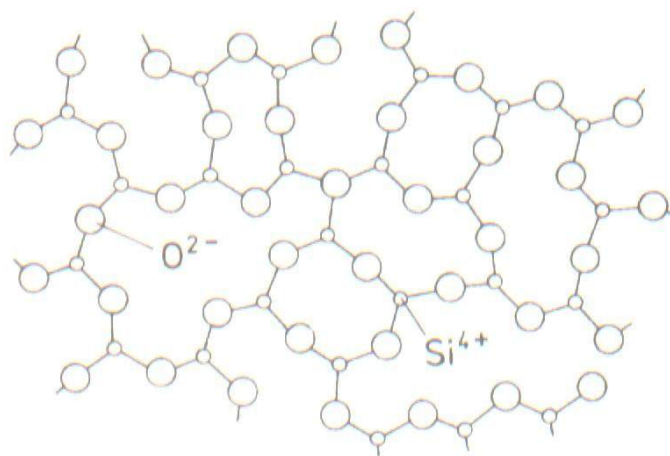


Figura 1 – Estrutura molecular do vidro (Chawla, 1998).

O processo de fabricação das fibras envolve a fundição do vidro a temperaturas da ordem 1500°C. Após a passagem pelos fornos o material fundido é depositado em recipientes aquecidos de liga de platina conhecidos como *bushings* (Figura 2). Estes recipientes possuem em sua base cerca de 50 a 200 pequenos orifícios conhecidos como *spinnerets*, pelos quais fluem por gravidade filamentos primários que irão constituir os filamentos principais ou fibras (Chawla, 1998). Após este processo as fibras recebem um tratamento químico, geralmente de silano, para proteção da superfície das mesmas contra agentes externos (Mano, 1991; Saint-Gobain, 2006).

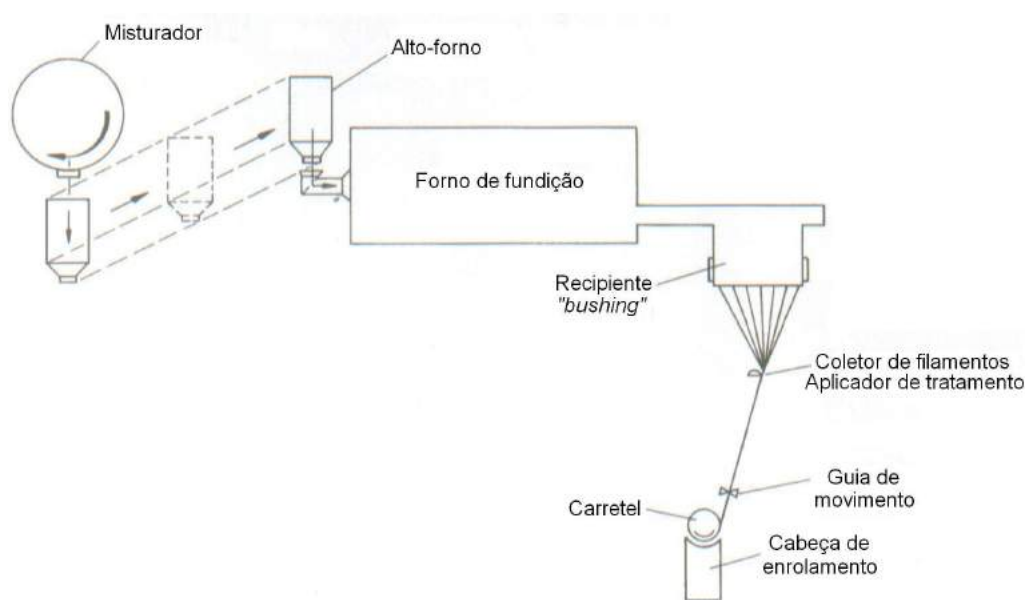


Figura 2 – Esquema de fabricação de fibras de vidro (adaptado de Chawla, 1998).

O processo de extrusão induz a orientação das cadeias moleculares das fibras, sendo isto mais intenso na superfície destas, facilitando de certa forma a adesão à matriz. O *grau de cristalinidade* é fortemente influenciado por esta orientação, fazendo com que a suscetibilidade à umidade seja demasiadamente diminuída devido à alta estabilidade química gerada. Além da orientação, o alongamento produz fibras mais resistentes e rígidas (Chawla, 1998).

A Figura 3 apresenta a forma como são comercializadas as fibras de vidro. Os fios cortados apresentados na Figura 3a possuem comprimento de 5 a 50 mm e são utilizados em painéis de compósitos poliméricos, sendo ideais para o processo de moldagem manual. Os fios contínuos (Figura 3b) são utilizados na fabricação de

compósitos pelo processo de filamento contínuo, sendo esta, por exemplo, utilizada na fabricação de tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV) (Stariz Corporation, 2006). Cabe destacar que as fibras de vidro são usuais como reforço em poliéster, epóxi e resinas fenólicas. As resinas reforçadas por fibras de vidro são utilizadas amplamente por diversas indústrias.



(a) fios cortados.



(b) fios contínuos.



(c) tapete em rolo.



(d) fios trançados.

Figura 3 – Formas de comercialização de fibras de vidro.

Fontes: (a) e (b) Stariz Corporation (2006); (c) Fibertex (2006); (d) Aerocon System Company (2006).

1.3 Fase matriz

Em um compósito, além de envolver o reforço, a matriz também tem a função de transmitir as solicitações a este e, em alguns casos, aumentar a tenacidade do conjunto. Uma função de destaque da matriz é proteger o reforço de danos de superfície provocados por abrasão mecânica ou ambientes agressivos. As matrizes

podem ser divididas em três grandes grupos, a saber, poliméricas, metálicas e cerâmicas (Almeida, 2004; Callister, 2000).

Segundo Rotheiser (2004), desde a década de 70 o volume de plástico produzido tem crescido em demasia, ultrapassando a produção de aço, por exemplo. As principais características das matrizes poliméricas são (Chawla, 1998; Callister, 2000):

- baixo custo e facilidade de processamento;
- maus condutores termoelétricos devido às ligações covalentes presentes;
- maior resistência a ataque químico do que as matrizes metálicas;
- baixa resistência mecânica, baixa temperatura de serviço e baixo módulo de elasticidade quando comparadas às demais;
- suscetibilidade à luz ultravioleta e a alguns solventes;
- estruturalmente apresentam maior complexidade que matrizes metálicas e cerâmicas.

As matrizes poliméricas são formadas por grandes cadeias de moléculas com átomos de carbono ligados por meio de ligações covalentes. O processo de formação destas cadeias é denominado de polimerização, ou seja, várias unidades de repetição (monômeros) reagem para gerar uma cadeia de polímero. (Lucas *et al.*, 2001).

Os tipos de polimerização existentes são: policondensação, poliadição e modificação química (Mano, 1991; Chawla, 1998). A policondensação está relacionada à reação entre monômeros produzindo o polímero desejado e outro co-produto. Em geral o co-produto é removido por meio de reação adicional. Exemplos de polímeros obtidos por policondensação são: poli-tereftalato de etileno (*PET*), policarbonato, resina epoxídica, poliuretano entre outros.

A Poliadição está relacionada à reação entre monômeros, geralmente em presença de catalisador, sem a geração de co-produto. Os monômeros envolvidos neste tipo de polimerização apresentam-se com ligações duplas (enos) entre átomos de carbono. Exemplos de polímeros obtidos por poliadição são: polietileno, polipropileno, poliestireno, borracha estireno-butadieno (*SBR*), polimetacrilato de metila (*PMMA*), policloreto de vinila (*PVC*), poliacetato de vinila (*PVAc*), entre outros.

A polimerização por modificação química é uma reação sobre polímeros já existentes, sejam estes naturais ou sintéticos. Exemplos de polímeros obtidos por

modificação química são: nitrato de celulose, policloreto de vinila clorado (CPVC), polietileno clorado entre outros.

Segundo Chawla (1998), o comportamento dos polímeros é função da estrutura, do tamanho e do peso molecular, além da quantidade e do tipo de ligação. Em termos de arquitetura molecular, os polímeros podem ser lineares, ramificados ou cruzados (Chawla, 1998; Callister, 2000). Os lineares são os polímeros mais flexíveis que possuem grande quantidade de ligações de Van der Waals entre as cadeias, caracterizadas por serem ligações fracas; os ramificados apresentam radicais anexados à cadeia principal; os cruzados ou em rede, apresentam uma malha tridimensional formando uma estrutura resistente e rígida.

Os polímeros podem ser amorfos ou cristalinos, onde a natureza química da cadeia molecular é o principal fator que influencia na probabilidade de um polímero exibir uma estrutura cristalina. Segundo Chawla (1998), um polímero cristalino é uma concepção idealizada, pois, na prática, a cristalinidade pode variar de 30 a 90% devido à extensão de uma cadeia. Esta cristalinidade é muitas vezes denominada de *grau de cristalinidade*, que depende do tipo de polímero, da temperatura de cristalização e do peso molecular. Cabe destacar que polímeros de monômeros contendo grupos laterais grandes ou ramificações têm menor grau de cristalinidade, pois o maior empacotamento das cadeias é inibido.

Salienta-se que cristalinidade de um polímero é função da temperatura (Figura 4). Quando o polímero fundido é resfriado, há um decréscimo de vibração molecular e redução de espaço livre tendo como resultado uma contração no material. Nos polímeros amorfos esta contração ocorre abaixo do ponto de fusão (T_m) de um polímero cristalino, exatamente no ponto de transição vítrea¹ (T_g), onde o líquido superesfriado torna-se extremamente rígido devido à alta viscosidade.

Quando os polímeros alcançam a temperatura de transição vítrea, as propriedades físicas destes, tais como viscosidade, capacidade calorífica, módulo de elasticidade, coeficiente de fricção e coeficiente de expansão térmica, variam bruscamente (Chawla, 1998; Rotheiser, 2004).

¹ Temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares torna-se restrita, devido à rotação dos grupos laterais.

Cabe ressaltar que a temperatura de transição vítrea (T_g) de um polímero é influenciada pela presença de grupos laterais volumosos, ligações duplas ou grupamentos aromáticos presentes na cadeia (Callister, 2000).

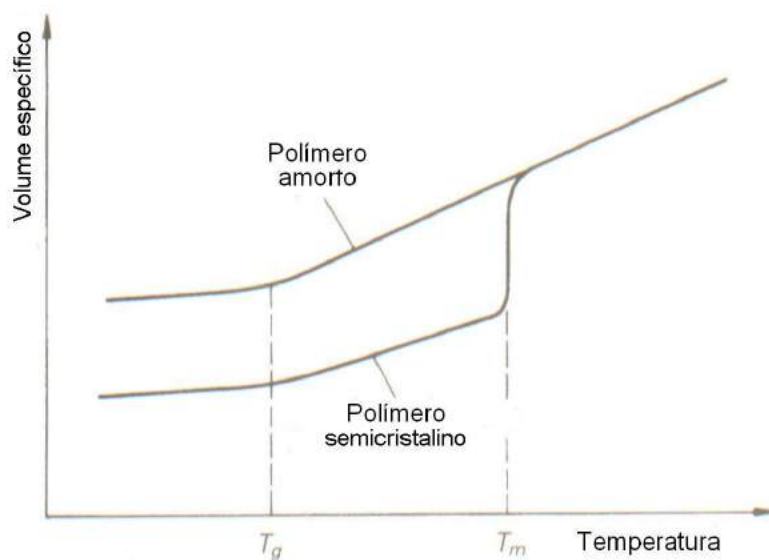


Figura 4 – Volume específico *versus* temperatura de um polímero amorfo e outro semicristalino (adaptado de Chawla, 1998).

Devido à marcante influência da temperatura nas propriedades físicas do material, os polímeros ainda podem ser classificados em 3 grandes grupos, isto é, termoplásticos, termofixos e elastômeros (Mano, 1991 e Callister, 2000).

Os polímeros termoplásticos são caracterizados por possuírem ligações químicas fracas entre as cadeias moleculares, viabilizando desta forma a produção em larga escala de artefatos por meio de extrusão ou injeção a baixas temperaturas. Além disso, apresentam a possibilidade de reciclagem e facilmente sofrem ataque químico. Em geral, estes são obtidos por meio de poliadição.

Os polímeros termofixos apresentam estrutura molecular cruzada devido às ligações covalentes entre as cadeias. Assim, uma vez produzidos, não podem ser reprocessados. Ao contrário dos polímeros termoplásticos, estes possuem maior estabilidade a ataques químicos. Em geral, os polímeros termofixos são obtidos por policondensação. Os polímeros elastoméricos são aqueles que têm redes com ligações cruzadas muito esparsas, admitindo assim grandes deformações elásticas.

As matrizes poliméricas mais comuns são os poliésteres, as resinas epoxídicas, as éster-vinílicas, os poliuretanos e as fenólicas. Os poliésteres são polímeros

insaturados que possuem como vantagens resistência à água, agentes químicos, intemperismo, envelhecimento, além de baixo custo. Podem resistir temperaturas entre 80°C e 93°C; além disso, combinam-se facilmente com fibras de vidro (Mano, 1991; Chawla, 1998; Mruk, 2004).

Resinas epoxídicas são polímeros termofixos que possuem grupamentos oxiranos, isto é, um átomo de oxigênio ligado covalentemente a cada dois átomos de carbono, conforme pode ser observado na Figura 5.

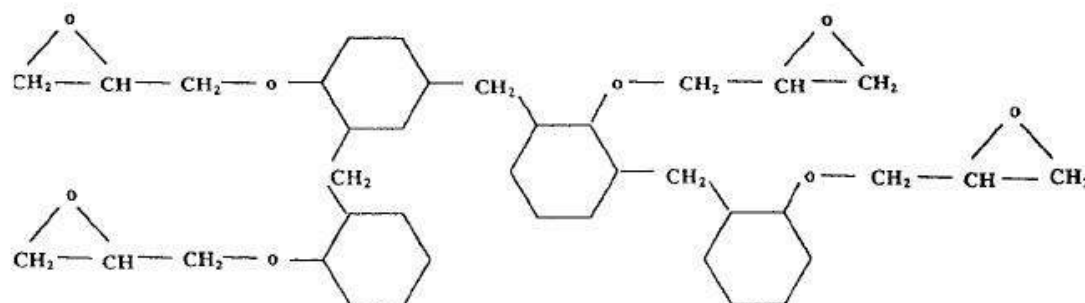


Figura 5 – Fórmula estrutural de resina epoxídica (Wright, 2004).

Existem primordialmente dois tipos de resinas epoxídicas, aquelas que curam a baixa temperatura (120°C) e são utilizadas em componentes expostos à moderada variação de temperatura, e as que curam a uma temperatura mais alta (175°C) e são utilizadas em componentes de alto desempenho e expostos à umidade e temperatura elevadas (Almeida, 2004).

Um problema importante em matrizes poliméricas está associado aos efeitos ambientais. Polímeros podem degradar sob altas temperaturas e absorção de umidade. Tal absorção causa expansão e redução da temperatura de transição vítrea (T_g). Além disso, o efeito higrotérmico pode gerar tensões internas na interface fibra-matriz (Chawla, 1998; Gibson, 2003).

Devido às limitações ao efeito higrotérmico das matrizes epoxídicas, foi desenvolvido na década de 70 uma resina com dois grupamentos epóxi de baixo peso molecular conhecida como *DGEBA* (Éter diglicidil de bisfenol A). São ainda utilizados aditivos para reduzir a viscosidade, aumentar a flexibilidade e como proteção ultravioleta. A resistência química e a máxima temperatura de uso de resinas epoxídicas dependem do tipo de resina e do catalisador utilizado. Destaca-se que o

DETA (Dietilenotriamina) é outro catalisador muito comum na confecção de adesivos epoxídicos (Chawla, 1998; Gibson, 2003; Mruk, 2004).

Resinas epoxídicas são mais caras do que as poliésteres, no entanto, possuem melhor resistência à umidade, menor retração na cura, maior limite de temperatura de utilização e possuem excelente adesão às fibras de vidro. As resinas éster-vinílicas possuem propriedades intermediárias entre as epoxídicas e as poliésteres, e as resinas fenólicas têm a grande vantagem de serem resistentes à chama, pois têm baixa emissão de fumaça e não produzem nenhum produto tóxico, destacando que a presença de fibras de vidro auxilia neste fenômeno (Chawla, 1998; Gibson, 2003).

1.4 Compósitos de matriz polimérica (CMP)

1.4.1 Tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV)

Para a fabricação de tubulações de PRFV são utilizados os métodos de moldagem por centrifugação e filamento contínuo. O processo de moldagem por centrifugação é um método pelo qual resina e reforço são dispostos dentro de um molde que é rotacionado e, geralmente, aquecido. Durante o processo a resina é polimerizada e o tubo é formado. Neste método o diâmetro interno do tubo é função da quantidade de resina e reforço; todavia, o diâmetro externo é constante (Laney, 2002).

Filamento contínuo é um processo automatizado em que filamentos contínuos são tratados com banho de resina e enrolados em um mandril com um determinado padrão angular. Desta forma, pode-se dizer que as tubulações de PRFV são compósitos laminados, isto é, possuem uma sucessão de lâminas ortotrópicas onde cada lâmina possui uma direção preferencial.

Por meio das tensões na parede das tubulações desenvolvidas quando aplicada pressão interna, pode-se determinar o ângulo ótimo de enrolamento. Conforme a Figura 6, considerando tubos de laminação simétrica e solicitações absorvidas em sua totalidade pelas fibras, tem-se:

$$f = \frac{rP}{t} \sin^2 \theta \quad (1)$$

$$f_1 = f \sin^2 \theta \quad (2)$$

$$f_2 = f \cos^2 \theta \quad (3)$$

Onde, f é a tensão na parede na direção de enrolamento, f_1 é a tensão hidrostática e f_2 é a tensão axial, r é o raio principal do tubo, t é a espessura do laminado, P é a pressão interna. Assumindo que a tensão axial (f_2) é metade da tensão hidrostática (f_1), o ângulo obtido é de aproximadamente 55° (Wahab *et al.*, 2006).

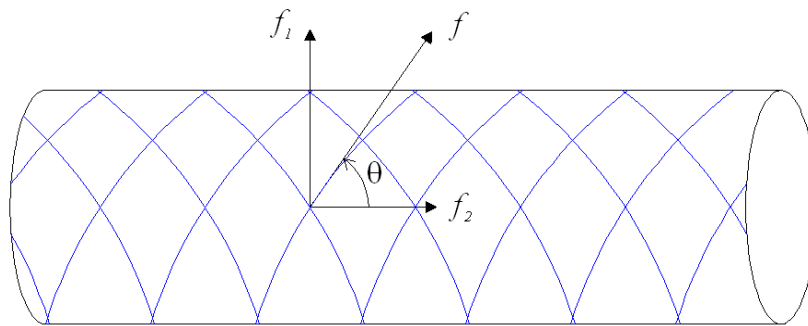


Figura 6 – Padrão de enrolamento em tubo de lamination simétrica submetido à pressão interna.

A espessura da parede da tubulação é alcançada com a deposição sucessiva no mandril; em seguida a cura é efetuada a temperaturas elevadas (entre 120 e 175°C) e o mandril é removido. Pode-se utilizar no processo sílica pura como agregado de enchimento (Chawla, 1998; Gibson 2003; Almeida, 2004; Salibi, 2001). Este processo segue as prescrições normativas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM)².

Para a superfície interna e/ou externa utiliza-se véu de vidro para torná-la rica em resina. Com isto obtém-se melhor resistência à corrosão e consegue-se bom aspecto estético. (Gibson, 2003).

Segundo Chawla (1998) e Callister (2000), os compósitos de matriz polimérica têm as vantagens de baixa condutibilidade elétrica, alta resistência à corrosão química, alto módulo de elasticidade, densidade menor que a do aço e alumínio, podem ser

² ASTM D 2996 (2001), ASTM D 4024 (2005) e ASTM D 5685 (2005).

fabricados em diversas cores e formatos, possuem baixo custo de manutenção, além de fácil instalação e alta resistência mecânica.

A utilização de tubulações de compósitos em plataformas *offshore* teve início com a proeminente necessidade de materiais mais leves e resistentes à corrosão, para a redução do peso das plataformas, bem como nas aplicações em ambientes salinos. Estas são utilizadas tanto em plataformas de perfuração quanto de produção de petróleo. Estes tipos de tubulação podem ser encontrados, também, desde sistemas de tratamento de efluentes até oleodutos de vários quilômetros (Gibson, 2003; Brum, 2002). Tais tubulações são recomendadas para utilização em sistemas de exaustão, transporte de efluentes gasosos inertes, serviços sanitários, drenagem entre outras (Ameron International, 2006).

No Brasil, tubulações de compósitos são utilizadas em sistemas de captação de água para refrigeração e injeção, além de combate a incêndio. Brum (2002) estima que em uma plataforma com capacidade de produção de 100 mil barris de óleo por dia, cerca de 40% das tubulações é feita de plástico reforçado.

Os compósitos de PRFV vêm sendo utilizados na Bacia de Campos desde 1994, na unidade de Pampo, com a instalação de 2.000 m² de grade de piso pultrudado. Em 1997 foi realizada a primeira utilização em larga escala de sistemas de tubulação em filamento contínuo no projeto de conversão da plataforma P-27 (Farias e Balbi, 2004).

Deve-se ressaltar que na indústria do petróleo estas tubulações estão operando em temperaturas da ordem de 85°C podendo chegar a transientes térmicos de até 115°C devido à característica intrínseca do óleo nacional de ser extremamente viscoso quando comparado ao óleo do exterior, necessitando de tratamento com fluidos a temperaturas elevadas (Farias e Balbi, 2004).

Devido à alta estabilidade a ambientes agressivos, as tubulações de PRFV são muito utilizadas na indústria da dessalinização, operando nas mesmas condições que as supracitadas para a indústria do petróleo, nos processos de cloração, limpeza ácida e salmoura. Além disso, podem operar acima do tempo de vida útil de 50 anos, mesmo nestes ambientes agressivos (Salibi, 2001).

Deve-se salientar que o baixo coeficiente de fricção e as características hidráulicas dos tubos de PRFV serem constantes ao longo do tempo, suavizam as condições de trabalho das bombas, aumentando o tempo de vida útil e de manutenção

destas últimas (Salibi, 2001). A Tabela 1 apresenta um comparativo de algumas propriedades de tubulações de PRFV e de aço.

Tabela 1 – Comparativo de propriedades de tubulações utilizadas na indústria (adaptado de Salibi, 2001).

Material	Massa específica (g.cm ⁻³)	Resistência à tração (MPa)	Resistência específica ³ (x 10 ⁴ cm)
PRFV	2,54	3448	1357
Aço	7,83	1034	132

Percebe-se que o sistema PRFV possui elevada resistência específica quando comparado ao similar metálico, pois além de ter alta resistência, é extremamente leve. Sendo assim, pode-se dizer que o sistema possui grandes vantagens de instalação, isto é, o sistema pode ser montado e testado *in loco* e propicia o projeto de junções complexas, além de minorar a incidência de manutenção e substituição, auxiliando na diminuição dos tempos de parada das unidades. Salibi (2001) ressalta que a elevada variedade de juntas disponíveis contribui para o exposto anteriormente.

Cabe ressaltar que não há necessidade de proteção catódica, pois o material é isolante elétrico. Além disso, tem elevada resistência à fadiga sob carregamento cíclico, relativamente boa resistência ao fogo e, ainda, os efeitos diferenciais de pressão em tubos de PRFV são cerca de metade do aço (Salibi, 2001).

Segundo Gibson (2003), as resinas epoxídicas são amplamente utilizadas em tubulações de PRFV. Em terra, muitas vezes pode-se encontrar tubulações tanto a baixa e alta pressão. Contudo, nas aplicações *offshore* têm-se utilizado somente em casos de tubulações a baixa pressão (Figura 7). Deve-se ressaltar que os *GRE* (*Glass Reinforced Epoxy*) são imunes a H₂S e CO₂; mas, deve-se estar atento à presença dos compostos do tipo xileno e tolueno.

Nos últimos 20 anos têm se intensificado as pesquisas no que tange à eliminação das barreiras existentes para o uso de tubulações de PRFV. Estas barreiras estão relacionadas, por exemplo, à falta de exigências regulamentares, principalmente quanto à combustibilidade, além da inexistência de procedimentos de dimensionamento

³ Razão entre a resistência à tração e o produto da massa específica do material pela aceleração da gravidade.

confiáveis combinada com a não familiaridade por parte dos projetistas. A partir do início dos anos 90 teve início a regulamentação deste tipo de material pelas normas *International Organization for Standardization (ISO)* e *American Petroleum Institute (API)* para a indústria do petróleo (Gibson, 2003; Brum 2002). Outro problema que se tem buscado solucionar é o comportamento destas tubulações frente aos efeitos de ambientes agressivos, bem como à fadiga, ao desgaste e ao impacto (Gibson, 2003).



Figura 7 – Tubulação de PRFV em plataforma *offshore* (Ameron International, 2006).

1.4.2 Juntas em tubulações de PRFV

Segundo Gibson (2003), os tipos de juntas (Figura 8) em tubulações de PRFV podem ser do tipo coladas por meio de adesivo, laminadas (*butt and wrap joints*) ou ainda mecânicas como a junta de selo de borracha (*Rubber seal* ou *Key-lock joints*) ou junta embutida (*threaded joints*).

As juntas ligadas por meio de adesivo podem ser do tipo cônico-cônico (*taper-taper*), ponta-bolsa (*socket and spigot*) ou *quick-lock*, sendo que este último possui as paredes das conexões paralelas. A bolsa e a luva do conjunto devem ser moldadas por filamento contínuo e a ponta do tubo deve ser preparada por meio de devanagem ou raspagem. Em geral são utilizados adesivos epoxídicos termo-curados, onde a cura é

efetuada utilizando-se cobertores ou mantas (Gibson, 2003). Segundo Knox *et al.* (2001) o tipo *taper/taper* oferece grandes vantagens em termos de produção da junta e desempenho.

As juntas *laminadas* são construídas com as extremidades dos tubos em contato, com a deposição sucessiva de lâminas de compósito de fibra de vidro. Embora sejam mais baratas que as juntas coladas, do ponto de vista de execução, as juntas laminadas são muito mais trabalhosas (Gibson, 2003).

As juntas mecânicas com selo de borracha são comumente utilizadas em tubulações submetidas a baixas pressões devido à facilidade de se conectar e desconectar. São utilizados anéis de borracha inseridos em sulcos para evitar vazamento de água. A carga axial é suportada por uma chave cilíndrica de náilon inserida em um sulco tangencial. Este tipo de junta permite a utilização de grandes vãos com baixo custo de execução, além de ser capaz de acomodar alguma deflexão no sistema. As *juntas embutidas* são indicadas para aplicações que necessitem de altas pressões (Gibson, 2003).

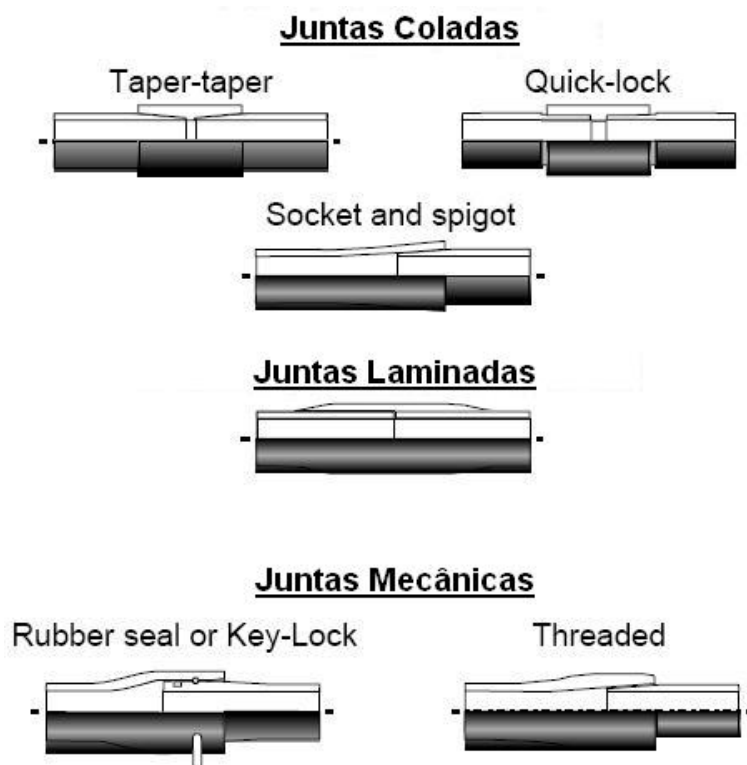


Figura 8 – Tipos de juntas em tubulações de PRFV (adaptado de Gibson, 2003).

1.4.3 Modo de falha em sistemas de tubulações de PRFV

Segundo Gibson (2003), o modo de falha das tubulações de PRFV não é catastrófico, pois quando o processo de fissuração se inicia na resina, com o aumento de pressão, ocorre o vazamento do fluido através da parede da tubulação. A pressão necessária para que isto ocorra é bem menor do que aquela capaz de romper o reforço.

Em substituição às juntas unidas por meio de fixação mecânica, a união por adesão vem sendo amplamente utilizada, sendo que a confiabilidade desta é função primordial da presença de defeitos na área colada (Berry e d'Almeida, 2000).

Os tipos de defeitos ou falhas que podem ocorrer em CMP pultrudados, de forma análoga em sistemas de tubulações de PRFV, são: bolhas, trincas, fissuras, delaminação, além de cura insuficiente (Almeida, 2004).

Bolhas são elevações arredondadas superficiais ou internas, que são classificadas de poros quando são de pequeno diâmetro e, caso contrário, são classificadas como vazios. *Trincas* são separações visuais que ocorrem internamente ou penetram abaixo da superfície do compósito.

Fissuras são múltiplas trincas que podem ser superficiais ou não, impedindo que a matriz transmita normalmente as solicitações ao reforço devido à concentração de tensões. *Delaminação* é a separação de duas ou mais camadas de material ou planos de reforço dentro do compósito. Por último, *cura insuficiente* é uma condição que provoca a diminuição das propriedades físicas do material, que pode ser causada por temperatura de cura insuficiente ou catalisador impróprio (Almeida, 2004).

Segundo Drinkwater (1998) *apud* Knox *et al.* (2001) e Midleton e Smith (1996) *apud* Knox *et al.* (2001), três tipos de defeitos principais podem ser encontrados em juntas coladas: baixa adesão; quantidade de adesivo insuficiente; porosidade excessiva.

Dentre as técnicas existentes para a detecção de defeitos em tubulações de PRFV destacam-se os ensaios não-destrutivos. O ponto de partida para qualquer tipo de análise não-destrutiva é a inspeção visual. A Tabela 2 apresenta alguns tipos de defeitos e as técnicas apropriadas para a detecção do tipo de falha.

Segundo Farias e Balbi (2004), os principais tipos de falhas encontradas em tubulações de PRFV em plataformas *offshore* na Bacia de Campos foram: delaminação,

blooming, rupturas de juntas coladas e defeitos de suporte. Problemas deste tipo também foram relatados por Sada e Corte (2004).

A delaminação ocorre quando as tensões de serviço estão acima das estipuladas em projeto, ou seja, são maiores que a resistência do compósito (Figura 9a). Pode ocorrer também devido à temperatura de operação ser maior que o *HDT* (*Heat Distortion Temperature*)⁴. Não se deve descartar também a possibilidade de defeitos de fabricação do compósito. Os defeitos de suporte ocorrem quando não há restrição de movimento em determinada direção (Figura 9b). O *blooming* é um efeito caracterizado pela exposição das fibras devido à degradação da resina pelo efeito de radiação ultravioleta (Figura 10). A ruptura das juntas unidas por adesivo pode ser devido à falha no adesivo ou no compósito (Figura 11). Estes defeitos são decorrentes, principalmente, devido à execução errônea do processo de colagem no que tange à limpeza da superfície, à especificação inadequada do adesivo, bem como a não eliminação de vazios decorrentes do processo de manipulação deste (Farias e Balbi, 2004). Por outro lado, como já foi citado que na indústria *offshore* estes materiais estão submetidos a temperaturas elevadas, por serem compósitos de matriz polimérica, eles estão sujeitos aos efeitos deletérios da combinação umidade e temperatura.

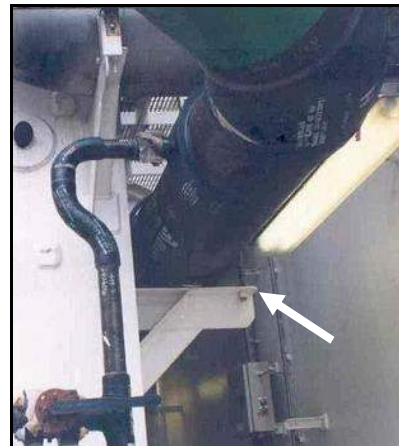
Tabela 2 – Defeitos em tubulações e juntas de PRFV e técnicas apropriadas de ensaios não-destrutivos (The Norwegian Oil Industry Association, 1997).

Defeito	Técnica apropriada
Delaminação	Radiografia, emissão acústica, ultrassom, termografia
Fraturas e fissuras	Líquido penetrante, emissão acústica, ultrassom, radiografia
Fissuração da matriz	Líquido penetrante, emissão acústica
Poros e vazios	Radiografia, ultrassom, emissão acústica
Fissuras em flanges	Líquido penetrante, emissão acústica
Desgaste ou abrasão	Teste de pressão, emissão acústica
Cura incorreta	Emissão acústica
Desalinhamento de juntas	Ultrassom, emissão acústica
Tratamento impróprio dos aderentes	Teste de pressão, emissão acústica

⁴ Temperatura pela qual um material sofre deflexão de 0,25 mm sob uma carga constante (Rotheiser, 2004).



(a)



(b)

Figura 9 – (a) delaminação; (b) falha de suporte (Farias e Balbi, 2004).



(a)

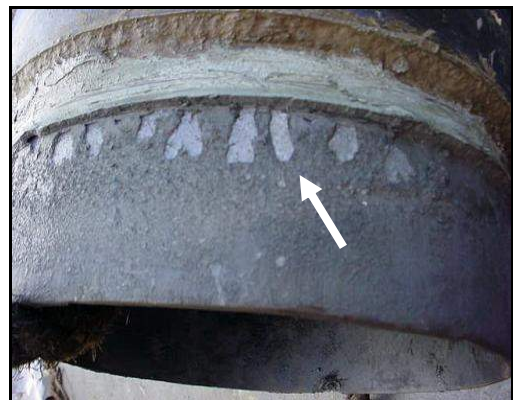


(b)

Figura 10 – (a) *blooming* no tubo; (b) *blooming* na junta (Farias e Balbi, 2004).



(a)



(b)

Figura 11 – (a) falha na junta; (b) vazios no adesivo (Farias e Balbi, 2004).

1.4.4 Especificações técnicas em tubulações de PRFV

Segundo Gibson (2003), o principal meio de se assegurar a integridade de um sistema de tubulação de PRFV é através do ensaio hidrostático efetuado a pressões 1,5 vezes superiores à pressão de serviço. A tensão hidrostática é obtida pelo ensaio hidrostático em meio a ambiente de temperatura controlada segundo as prescrições da ASTM D 1599 (2005), sendo esta relacionada à ruptura do corpo-de-prova em um curto intervalo de tempo (entre 60 e 70 s).

O modo de falha está relacionado a qualquer perda de pressão, ou qualquer passagem de fluido através da parede do tubo. As Equações 4 e 5 apresentam de que forma pode ser calculada a tensão hidrostática de ruptura. A Equação 4 é utilizada para diâmetro externo controlado (moldagem por centrifugação) e a Equação 5 é utilizada para diâmetro interno controlado (filamento contínuo).

$$S = P(D - t)/2t \quad (4)$$

$$S = P(d + t)/2t \quad (5)$$

Onde, S é a tensão hidrostática, P é a pressão interna, D é o diâmetro externo médio excluindo os revestimentos não reforçados, d é o diâmetro interno médio e t é a espessura mínima do tubo.

Uma outra possibilidade é a determinação da resistência a longo prazo ou fluência da tubulação como prescrito pela ASTM D 1598 (2002). Diferentemente do método discutido anteriormente, este preconiza a determinação da tensão hidrostática de ruptura frente a uma exposição sob pressão interna constante por um longo período de tempo.

Já a resistência à tração hidrostática ou aparente é obtida por meio do ensaio de compressão diametral em anéis com entalhes (*split disk method*), conforme preconizado pela ASTM D 2290 (2004). A Figura 12 apresenta maiores detalhes do corpo-de-prova padrão.

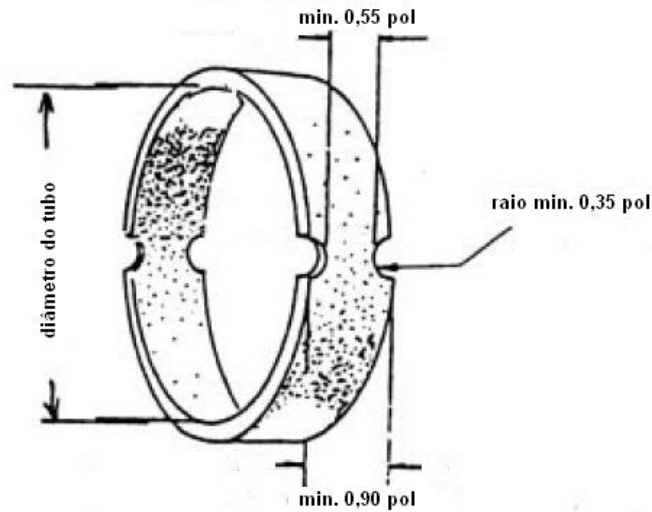


Figura 12 – Prescrições necessárias para o ensaio *split disk method* (adaptado de ASTM D 2290, 2004).

A Equação 6 apresenta de que forma pode ser obtida a resistência à tração aparente (σ_a), onde P_b é a carga de ruptura e A_m é a menor área da seção transversal do anel.

$$\sigma_a = P_b / 2A_m \quad (6)$$

O módulo de tração hidrostática pode ser obtido por meio das curvas σ - ϵ (tensão-deformação) ou P - d (carga-deslocamento) geradas no ensaio.

Além da resistência à tração axial de tubulações de PRFV, a ASTM D 2105 (2001) permite a determinação do módulo de elasticidade, da tensão de escoamento, da deformação de ruptura e de pico. Desta forma pode-se obter a lei de comportamento à tração do material.

Por meio de uma medida de deflexão em função do tempo, a ASTM D 2925 (2001) permite a determinação do módulo elástico aparente. A Figura 13 apresenta maiores detalhes deste ensaio.

O módulo de elasticidade aparente pode ser obtido pela seguinte equação:

$$E = \frac{22,5wL^4}{0,0491(D^4 - d^4)} \quad (7)$$

Onde, w é a soma do peso do tubo e do fluido, L é o vão entre os apoios, y é a máxima deflexão medida, D e d são, respectivamente, os diâmetros médios externo e interno do tubo ensaiado.

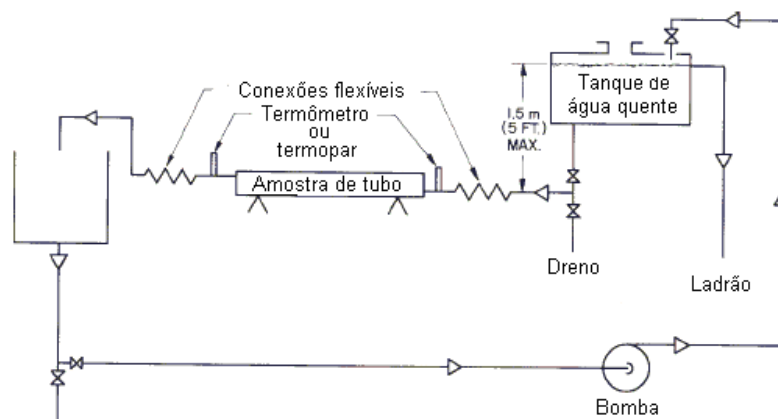


Figura 13 – Esquema do ensaio de deflexão em tubulações de PRFV (adaptado de ASTM D 2925, 2001).

A ASTM D 2992 (2001) prescreve dois procedimentos para a determinação da pressão de dimensionamento em tubulações de PRFV. O procedimento A consiste na exposição das amostras a uma pressão interna a uma taxa de 25 ciclos/min. O procedimento B consiste na exposição das amostras a uma pressão interna constante conforme a ASTM D 1598 (2002).

1.5 Alguns estudos da literatura sobre CMPs

Berry e d'Almeida (2000) avaliaram o comportamento de juntas coladas sobrepostas simples de compósitos de epóxi reforçados com fibras unidirecionais de carbono em presença de defeitos. A simulação de defeito foi possível com a utilização de discos de teflon colocados no centro da junta, sendo que a área do defeito variou conforme o diâmetro do disco. O adesivo utilizado foi um tipo de resina epoxídica denominada de DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A). Os resultados foram comparados com diversos modelos para análise de distribuição de tensões em juntas sobrepostas.

Foi verificada grande dispersão na carga de ruptura das juntas avaliadas e todas as juntas com defeitos apresentaram carga de ruptura menor que seus similares de

referência. Este comportamento foi verificado para juntas com área de defeito muito pequena. A colocação de um disco de teflon para simular um defeito nas juntas unidas por colagem é satisfatória, pois não há adesão entre o teflon e o adesivo.

Para o sistema adesivo-substrato empregado e para o tipo de junta e carregamento analisados, a tensão cisalhante média foi constante e função direta da área real colada; ou seja, avaliando-se o tamanho do defeito é possível prever a carga de ruptura da junta, por exemplo, por meio de alguma técnica não destrutiva de identificação de defeitos. Este resultado foi considerado como bastante relevante do ponto de vista prático.

Brum (2002) desenvolveu um trabalho que teve como principal objetivo propor uma metodologia de colagem de juntas de tubulações de PRFV. Para tanto foram executados ensaios de tração em sistemas substrato-adesivo com diferentes conformações do substrato e variação da área de colagem. Para auxiliar a adesão, as paredes dos substratos sofreram tratamento superficial (lixamento da superfície e remoção de resíduos da lixa). Além disso, previamente, com o intuito de se avaliar o comportamento da curva de cura do adesivo em função do tempo, isto é, avaliar o tempo de manuseabilidade do adesivo (*pot life*), foram executados testes de viscosidade. Os resultados de resistência à tração mostraram a existência de uma interação química entre o adesivo e o material do substrato, sugerindo que a seleção do adesivo é muito mais importante que o tratamento de superfície.

Com o objetivo de avaliar a tolerância a defeitos das juntas coladas do tipo *taper/taper*, Knox *et al.* (2001) desenvolveram uma série de estudos experimentais e numéricos variando-se o tamanho e a posição do defeito, a temperatura e a aplicação de carregamento em função do tempo. Dentre os tipos de defeitos mais comuns em juntas coladas, os mesmos optaram por simular aqueles referentes à baixa adesão que causam perda de aderência (*debond*). As juntas foram avaliadas a curto e longo prazo, isto é, avaliados os efeitos estático e de fluência no desempenho do sistema. Com relação à fluência, foram aplicados nos corpos-de-prova 19% da carga de dimensionamento. Os tipos de ações aplicadas foram: tração, tração+pressão interna, flexão e flexão+pressão interna, sendo o defeito foi simulado em 3 zonas distintas, conforme pode ser visualizado na Figura 14.

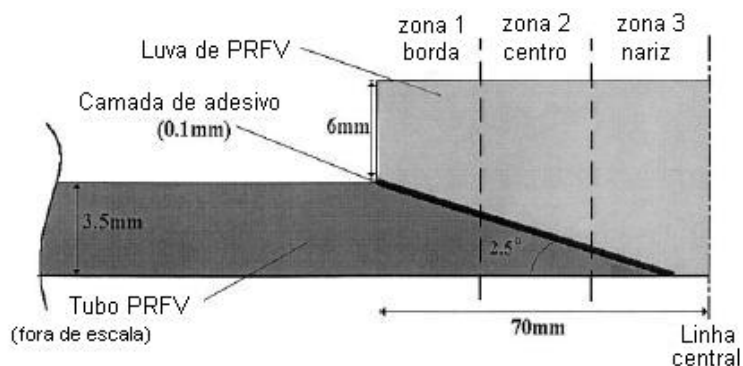


Figura 14 – Junta colada tipo *taper/taper* de PRFV para tubulação de 100 mm de diâmetro (adaptado de Knox *et al.*, 2001).

Na simulação experimental, tais defeitos foram possíveis com a utilização de um *spray* de teflon. Foram utilizadas também tubulações com pressão de dimensionamento de 2,0 MPa, conforme o fabricante, além de adesivo bicomponente termo-curado. As temperaturas de avaliação foram 65 e 90°C. Foram medidas as deflexões do sistema nos casos de ensaio de flexão a 3 pontos.

A Figura 15 apresenta a distribuição de tensões de clivagem e cisalhante na camada de adesivo devido à solicitação de tração sem a simulação de defeitos. Percebe-se que, à medida que se aproxima da zona 1, as tensões cisalhantes elevam-se bruscamente. Sob todas as condições de carregamento verificadas em juntas sem defeito, a distribuição de tensões apresentou um pico na zona 1. A Figura 16 apresenta a influência da adição de defeitos nas juntas *taper/taper*. Percebe-se a significativa influência de defeitos na tensão principal quando localizados na zona 1 (borda).

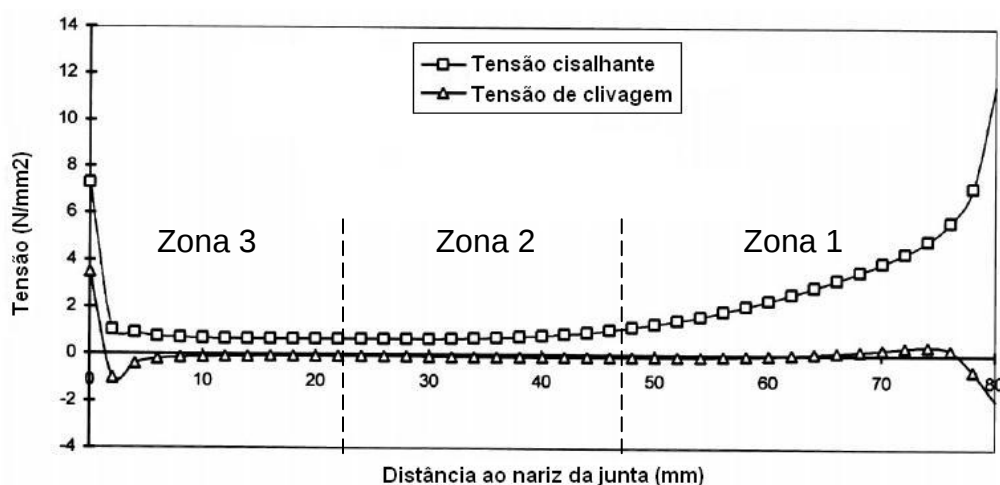


Figura 15 – Distribuição de tensões cisalhantes e de clivagem da junta em função da distância ao nariz da junta, isto é, zona 3 (adaptado de Knox *et al.*, 2001).

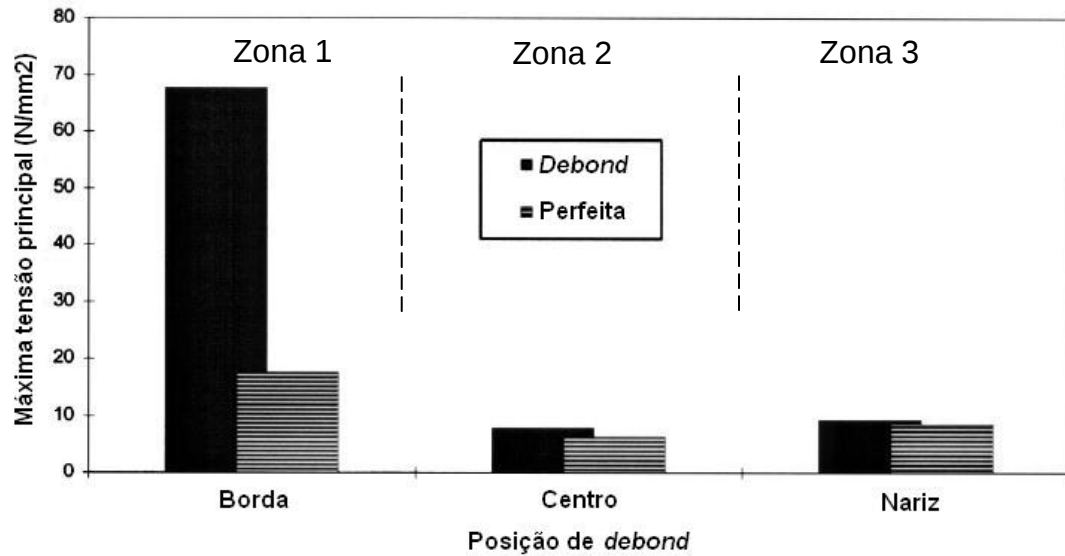


Figura 16 – Efeito da posição do defeito nas tensões principais (adaptado de Knox *et al.*, 2001).

Com relação aos efeitos a longo prazo (fluência), foi verificado que na temperatura de 65°C a presença da junta não causa grandes diferenças de deflexão. Contudo, em temperaturas da ordem de 90°C, se houver algum defeito presente na junta, a possibilidade de deslocamento é grande (Figura 17).

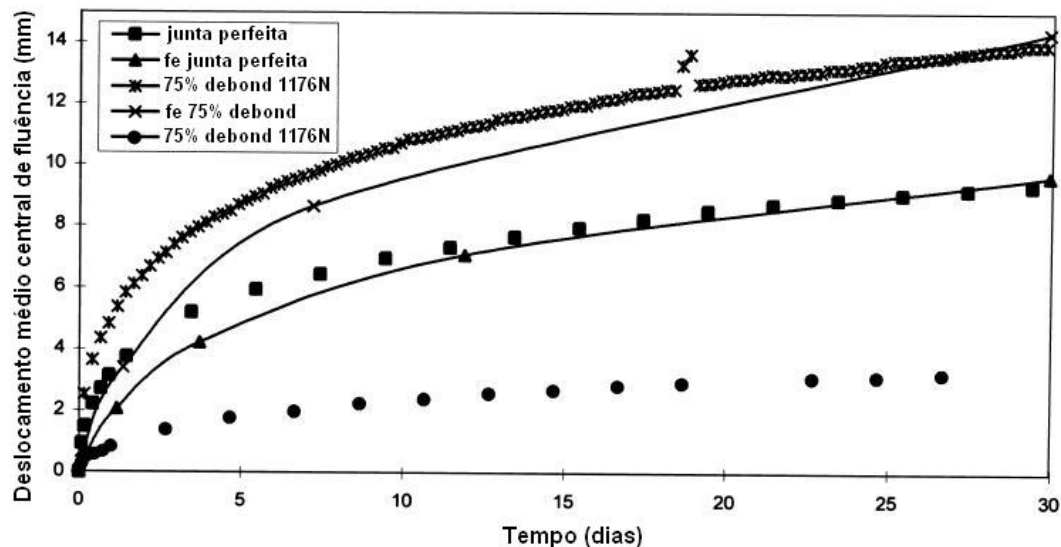


Figura 17 – Deslocamento de fluência numérico (f.e.) e experimental de tubulações PRFV com juntas *taper/taper* a 90°C (adaptado de Knox *et al.*, 2001).

1.6 Objetivos e justificativas

Frente aos inúmeros tipos de falhas encontradas nas juntas coladas de tubulações de PRFV, este trabalho buscou inicialmente caracterizar adesivos e tubos utilizados nestes tipos de juntas por meio de identificação química, degradação térmica e desempenho termomecânico. Além disso, como a grande frequência de falha neste sistema tem sido nas juntas tubo-adesivo, pretendeu-se também avaliar o comportamento do adesivo por meio de tração direta e o comportamento das juntas coladas por meio de ensaios hidrostáticos. Para fins de comparação, foram ensaiados também corpos-de-prova com juntas laminadas.

Tanto os ensaios hidrostáticos nos sistemas tubo-adesivo quanto os ensaios de tração direta no adesivo foram executados conforme as prescrições normativas vigentes. Todavia, como grande diferencial deste trabalho, pretendeu-se simular as condições encontradas *in loco*, ou seja, com a introdução da temperatura como a principal variável de ensaio, visto que não existe na literatura estudo deste tipo. Previamente, foi necessário desenvolver um equipamento eficaz para efetuar os ensaios hidrostáticos com variação de temperatura, monitorando pressão, temperatura e deformação nas juntas dos corpos-de-prova durante todas as etapas de ensaio, desenvolvendo-se um sistema confiável de instrumentação. Sendo assim, a partir dos ensaios em corpos-de-prova padronizados, fez-se possível conhecer o comportamento do sistema sob efeito de temperatura.

Este trabalho justifica-se pela proeminente inserção de tubulações de PRFV em plantas de processo de plataformas marítimas devido à alta incidência de corrosão nas tubulações convencionais (materiais metálicos). Além disso, a necessidade de diminuição do peso das unidades produtivas leva as indústrias a intensificarem o uso da tecnologia supracitada. Todavia, uma grande barreira a ser eliminada refere-se às condições operacionais de tais tubulações no que tange ao desempenho frente à combinação de pressão e temperatura, visto que foram observadas situações de falha em juntas coladas onde as temperaturas ultrapassavam 85°C, com transientes térmicos de 115°C, além de pressões acima de 1,5 MPa. Ressalta-se que as condições operacionais supracitadas são devido a característica intrínseca do óleo brasileiro que necessita de altas temperaturas para reduzir a sua alta viscosidade.

Pode-se dizer ainda que a parada das unidades produtivas para reparo e/ou substituição de juntas danificadas geram perdas financeiras significativas. Neste sentido, a indústria *offshore* tem lançado mão de alternativas mitigadoras, tais como substituição de juntas coladas danificadas por juntas laminadas, tornando, assim, o processo mais trabalhoso.

Destaca-se ainda que a alta dependência de profissional capacitado para a execução das atividades, além da falta de informações com relação ao comportamento físico e mecânico das uniões coladas, quando da variação das condições acima citadas, torna os procedimentos de reparo intimamente ligados ao conhecimento do material. Desta forma, o presente trabalho buscou lançar novos critérios de qualificação das juntas coladas, contemplando as condições de serviço, além dos ensaios de estanqueidade convencionais considerados pelas prescrições normativas vigentes.

2. Programa experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais (tubos, conexões e adesivos) e a metodologia dos ensaios realizados, isto é, caracterização de tubos e adesivos, ensaios de tração uniaxial de adesivos e ensaios hidrostáticos com variação de temperatura. Da caracterização buscou-se identificar quimicamente os materiais, bem como sua avaliação quanto ao desempenho termomecânico. Os ensaios trativos foram utilizados para avaliar o desempenho termomecânico dos adesivos. Os ensaios hidrostáticos foram utilizados para avaliar o desempenho termomecânico das juntas coladas tubo-adesivo.

2.1 Materiais

Como no presente trabalho foi avaliado o comportamento de juntas em tubulações de PRFV, fez-se necessário desenvolver um programa experimental utilizando materiais de diferentes fabricantes. Desta forma, foram utilizados:

- fabricante nacional – Edra do Brasil;
- fabricante internacional – Ameron International.

Cabe destacar que os tubos, as luvas, os flanges de ambos os fabricantes são confeccionados pelo processo de filamento contínuo em conformidade com a ASTM D 2996 (2001), ASTM D 4024 (2005) e ASTM D 5685 (2005).

2.1.1 Tubos e conexões

Nas Tabelas 3 a 6 são apresentadas as dimensões e propriedades físicas e mecânicas dos tubos e conexões que foram utilizados, provenientes do fabricante internacional para a série 7000M. A série de tubulações de PRFV 7000M da Ameron é utilizada para prevenir o acúmulo de níveis elevados de eletricidade estática devido ao fluxo dos fluidos. As cargas estáticas são acumuladas com o auxílio de condutores e dispersas por meio de aterramento. São prescrições do fabricante as uniões por junta colada *quick-lock* de 25 a 400 mm de diâmetro ou flangeadas a partir de 50 mm. Ressalta-se que neste trabalho foram utilizadas tubulações de 100 mm de diâmetro.

Tabela 3 – Dimensões de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Diâmetro nominal ⁵		Diâmetro interno		Espessura nominal		Massa linear
(pol)	(mm)	(pol)	(mm)	(pol)	(mm)	(kg/m)
4	100	4,14	105	0,21	5,2	3,0

Tabela 4 – Propriedades físicas de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Propriedade	Unidade	Valor
Condutividade térmica	W/m°C	0,33
Expansividade térmica linear	10 ⁻⁶ mm/mm/°C	18,0
Coeficiente de fricção	Hazen-Williams	150
Rugosidade absoluta	10 ⁻⁶ m	5,3
Massa específica	g.cm ⁻³	1,8

Tabela 5 – Propriedades mecânicas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Propriedade	Unid.	21°C	65°C	93°C	Método
Radial					
Tensão hidrostática de ruptura	MPa	165	-	128	ASTM D 1599
Módulo de tração hidrostática	GPa	25,2	-	22,1	Ameron
Coeficiente de Poisson (axial/hidrostático)	-	0,56	-	0,70	Ameron
Longitudinal					
Resistência à tração	MPa	59,0	-	46,6	ASTM D 2105
Módulo à tração	GPa	11,1	-	8,50	ASTM D 2105
Coeficiente de Poisson (hidrostático/axial)	-	0,37	-	0,41	ASTM D 2105
Flexão					
Módulo elástico aparente	GPa	11,7	-	6,90	ASTM D 2925
Pressão de dimensionamento ou hidrostática (HDB)					
Cíclico	MPa	-	41,4	-	ASTM D 2992 (Proc. A)

⁵ Existem tubulações de 1 a 40 polegadas de diâmetro nominal pertencente a esta série.

Tabela 6 – Pressão de colapso de tubos e conexões de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Diâmetro nominal		Pressão de colapso ⁶	
(pol)	(mm)	(MPa)	
		38°C	66°C
4	100	3,33	3,22

A Figura 18 e a Tabela 7 apresentam as dimensões de luvas tipo *quick-lock* para série 7000M de tubulações de PRFV segundo o fabricante internacional. As siglas OL, D_s, L e OD na Figura representam, respectivamente, comprimento da luva, profundidade da bolsa, largura do dente intermediário e diâmetro externo da luva.

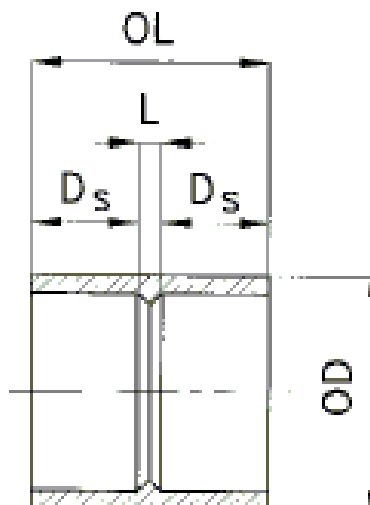


Figura 18 – Luva tipo *quick-lock* para sistemas de PRFV série 7000M proveniente do fabricante internacional (Ameron International, 2006).

Tabela 7 – Dimensões de luvas tipo *quick-lock* do sistema de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Diâmetro nominal		L	OL	D _s	OD	PMS ⁷	Massa
(pol)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(kg)
4	100	10	102	46	131	2,0	0,6

⁶ A pressão de colapso está relacionada à espessura mínima da tubulação, isto é, 87,5% da espessura nominal, assumindo que o *liner* (camada interna) não contribua para a resistência do tubo.

⁷ Pressão máxima de serviço.

A Figura 19 e a Tabela 8 apresentam as dimensões de flanges tipo *heavy-duty* para série 7000M de tubulações de PRFV segundo o fabricante internacional. As siglas D, D_S, L, BC, F e A na figura representam, respectivamente, espessura do flange, profundidade da bolsa, largura do dente externo, distância entre os furos diametralmente opostos, furo e diâmetro externo do flange.

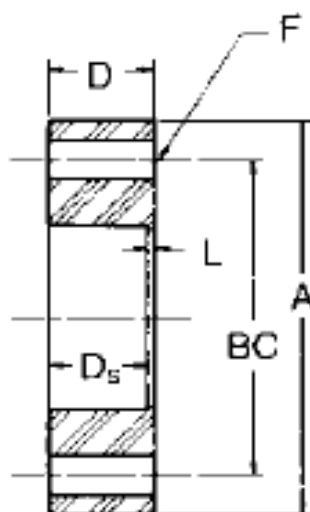


Figura 19 – Flange tipo *heavy-duty* para sistemas de PRFV série 7000M proveniente do fabricante internacional (Ameron International, 2006).

Tabela 8 – Dimensões de flanges tipo *heavy-duty* do sistema de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Diâmetro nominal (pol)	(mm)	A (mm)	BC (mm)	D (mm)	F (mm)	Furo (mm)	N.º de furos
4	100	225	187,5	50	18,75	15,5	8

Os tubos e conexões de PRFV do fabricante nacional são confeccionados com resina epóxi vinil-éster e os tipos de uniões existentes são: juntas laminadas, flangeadas e ponta-bolsa coladas com adesivo epóxi. Mediante a utilização de aditivos em sua composição, as tubulações são resistentes à chama e condutividade elétrica segundo as prescrições normativas.

Os sistemas operam até pressões da ordem de 2,0 MPa e transientes térmicos de 100 a 120°C (Edra do Brasil, 2006a). Nas Tabelas 9 a 11 são apresentadas, com relação ao fabricante nacional, as propriedades físicas e mecânicas dos tubos e conexões que foram utilizados neste estudo, bem como o vão máximo recomendado e as dimensões para tais tubulações.

Tabela 9 – Rigidez e distância máxima entre apoios ($L_{\text{máx}}$) de tubos de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).

Diâmetro nominal		PN10 ⁸		PN15		PN20	
		Rigidez ⁹	$L_{\text{máx}}$ ¹⁰	Rigidez	$L_{\text{máx}}$	Rigidez	$L_{\text{máx}}$
(pol)	(mm)	(GPa)	(m)	(GPa)	(m)	(GPa)	(m)
4	101,6	19,30	1,29	43,56	1,48	85,26	1,63

Tabela 10 – Coeficiente de correção de vão em função da temperatura de operação de tubos e conexões de PRFV para classe de pressão do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).

Temperatura (°C)	Fator de correção
Até 50	1,00
66	0,96
80	0,94
93	0,93

Tabela 11 – Dimensões e massa linear dos tubos de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).

Diâmetro nominal ¹¹		Massa linear		
		PN10	PN15	PN20
(pol)	(mm)		(kg/m)	
4	101,6	1,95	2,56	3,18

Na Figura 20 e na Tabela 12 são apresentadas as dimensões das luvas que foram utilizadas neste estudo, provenientes do fabricante nacional. As siglas L, L1, DN e DE na Figura 20 e Tabela 12 representam, respectivamente, comprimento da luva, profundidade da bolsa, diâmetro nominal da luva e diâmetro externo da luva.

⁸ PN é a pressão nominal em bar (1 bar = 14,5 psi = 0,1 MPa).

⁹ Os valores limites de rigidez e $L_{\text{máx}}$ são para temperatura de 38°C, densidade do fluido de 1kg/L e HDB igual a 0,3009%.

¹⁰ Os limites de distância máxima são para uma flecha limite de 1/200 do vão.

¹¹ Existem tubulações de 1 a 16 polegadas de diâmetro nominal pertencente ao fabricante nacional.

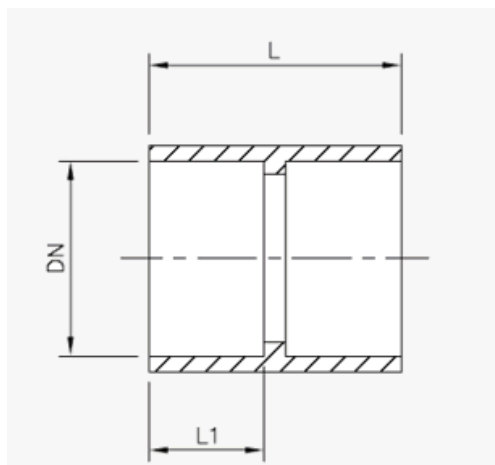


Figura 20 – Luva para sistemas de PRFV proveniente do fabricante nacional (Edra do Brasil, 2006a).

Tabela 12 – Dimensões de luvas do sistema de tubulações de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).

Diâmetro nominal (DN)		Dimensões		
(pol)	(mm)	L (mm)	DE (mm)	L1 (mm)
4	117,3	100,9	150	50

Na Figura 21 e na Tabela 13 são apresentadas as dimensões dos flanges que foram utilizados neste estudo, provenientes do fabricante nacional. As siglas DE, DF, F e E na Figura representam, respectivamente, diâmetro externo, distância entre furos diametralmente opostos, furo e espessura do flange.

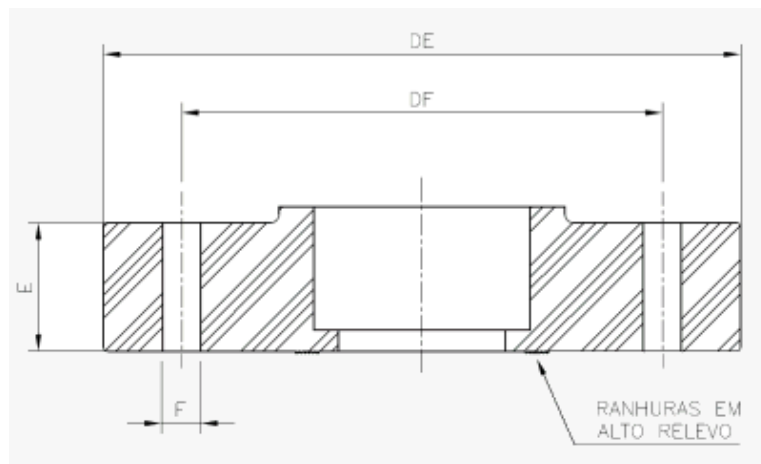


Figura 21 – Flange para sistemas de PRFV proveniente do fabricante nacional (Edra do Brasil, 2006a).

Tabela 13 – Dimensões de flanges do sistema de tubulações de PRFV do fabricante nacional (adaptado de Edra do Brasil, 2006a).

Diâmetro nominal		Dimensões (mm)				N.º de furos
(pol)	(mm)	DE	DF	E	F	
4	100	229	191	47	19	8

2.1.2 Adesivos

Para juntas coladas em sistemas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional recomenda-se a utilização do adesivo do tipo RP-60B, um tipo bi-componente (resina+catalisador) de epóxi com aço inoxidável como fíler. A Tabela 14 apresenta o tempo de aplicação (*pot life*) em função da temperatura ambiente para este tipo de adesivo.

Tabela 14 – Tempo de aplicação do adesivo RP-60B com a temperatura ambiente para sistemas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Temperatura ambiente (°C)	Tempo de aplicação (minutos)	
	3-oz kit ¹²	6-oz kit
21	60	45
27	53	40
32	45	33
38	35	25

Outro tipo de adesivo utilizado na série 7000M do fabricante internacional é o adesivo PSX-60, um tipo bi-componente (resina+catalisador) de epóxi com siloxanos. Ressalta-se que a resina contém preenchimento de sílica e, além disso, o adesivo é termo-curado. A Tabela 15 apresenta o tempo de aplicação (*pot life*) em função da temperatura ambiente para este tipo de adesivo.

¹² Oz é uma unidade de volume onça fluida (6 oz = 177 centilitros).

Tabela 15 – Tempo de aplicação, tempo de cura e de mobilidade do adesivo PSX-60 em função da temperatura ambiente para sistemas de tubulações de PRFV da série 7000M do fabricante internacional (adaptado de Ameron International, 2006).

Temperatura ambiente¹³	Tempo de aplicação (<i>pot life</i>)	Tempo mínimo de cura	Tempo mínimo de movimento¹⁴
(°C)	(minutos)	(horas)	(horas)
5	70	12	11
16	40	7	6
21	30	5	4
27	20	4	3
38	8	3	2

No presente trabalho foi utilizado o adesivo RP-60B proveniente do fabricante internacional nos ensaios de tração em adesivos e de caracterização dos materiais. Nos ensaios hidrostáticos em juntas coladas de tubulações PRFV foram utilizados os adesivos PSX-60.

Com relação ao adesivo utilizado pelo fabricante nacional, este é uma espécie de epóxi bi-componente (resina+catalisador) que possui tempo de aplicação (*pot life*) de 10 minutos à 20°C (Edra do Brasil, 2006a).

2.2 Métodos

Neste tópico é apresentada a metodologia das análises de caracterização dos adesivos e dos tubos, dos ensaios de tração uniaxial nos adesivos, bem como dos ensaios hidrostáticos em juntas coladas e laminadas de corpos-de-prova de PRFV. Cabe lembrar que todos os ensaios foram efetuados frente à variação de temperatura. São apresentadas individualmente as etapas de ensaios, assim como os equipamentos que foram utilizados.

¹³ Para temperaturas abaixo de 5°C, uma fonte de calor externa deve ser utilizada para facilitar a cura, e por outro lado, quando acima de 38°C deve-se resfriar os componentes antes da aplicação.

¹⁴ Tempo necessário para a junta sofrer qualquer mobilidade ou a tubulação ser utilizada. Isto é verificado após teste hidrostático.

2.2.1 Caracterização de tubos e adesivos

Para as análises foram utilizados materiais provenientes dos distintos fabricantes. Desta forma, foram avaliadas individualmente amostras de tubo de PRFV e os componentes do adesivo (denominados de A e B, respectivamente, resina e catalisador), bem como misturas nas seguintes proporções, em massa: 40%A-60%B, 50%A-50%B e 60%A-40%B. Optou-se por utilizar a mistura preconizada por cada fabricante (fabricante nacional, 50%A-50%B e fabricante internacional, 60%A-40%B) além de simular o erro de mistura por parte do profissional em uma situação de campo. A Tabela 16 apresenta a nomenclatura adotada para as amostras analisadas.

Tabela 16 – Nomenclatura das amostras analisadas.

Amostras	Nomenclatura	
	Edra do Brasil	Ameron International
Componente A (resina)	CPEA	CPAA
Componente B (catalisador)	CPEB	CPAB
40%A-60%B	CPE40A60B	CPA40A60B
50%A-50%B	CPE50A50B	CPA50A50B
60%A-40%B	CPE60A40B	CPA60A40B
Tubo de PRFV	CPET	CPAT

Para todas as análises de caracterização foram preparados corpos-de-prova com espessura variando entre 3 e 6,5 mm, tendo largura de cerca de 12 mm e comprimento de 60 mm. Todas as amostras foram lixadas para minorar os defeitos de superfície. Cabe salientar que foram utilizados no mínimo 3 corpos-de-prova para cada amostra estudada. As análises efetuadas foram espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (*FTIR*) com intuito de identificação química, análise termogravimétrica (*TGA*) com o intuito de verificar a degradação térmica, análise termodinâmico-mecânica (*DMTA*) e temperatura de amolecimento de Vicat para avaliar o desempenho termomecânico dos materiais. Destaca-se que estas análises foram efetuadas no laboratório do CCDM/UFSCar em São Carlos-SP.

2.2.1.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (*FTIR*) consiste em incidir radiação eletromagnética correspondente à faixa do infravermelho (4000 cm^{-1} – 400 cm^{-1}) em determinado material. A energia associada à faixa do infravermelho, uma vez absorvida, converte-se em energia de rotação ou vibração molecular. Por ser um fenômeno quantizado e dependente dos grupamentos químicos presentes na amostra, a análise e a interpretação de um espectro no infravermelho obtido apresentam a determinação de estrutura molecular, identificação e determinação qualitativa/quantitativa de espécies químicas nesta amostra (Ramachandran e Beaudoin, 2001). A identificação química foi de suma importância na dissertação, pois *a priori* era desconhecida a composição química do material que se estava lidando.

Para as análises de *FTIR* foi utilizado um espectrofotômetro Nexus 4700 da Thermo Nicolet. O espectro foi obtido com 32 repetições, leitura de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} e resolução igual a 4 cm^{-1} . Os espectros na região do infravermelho das amostras de resina (CPEA e CPAA) e catalisador (CPEB e CPAB) foram obtidos colocando-se uma pequena quantidade destas amostras sobre cristais de KBr. Para as demais amostras os espectros foram obtidos segundo duas condições distintas, a saber: prensagem de raspas de material com cristais de KBr em pastilhas; pirólise das amostras e análise do produto destas.

2.2.1.2 Análise termogravimétrica (TGA)

Na análise termogravimétrica (*TGA*) a massa da amostra é continuamente medida em função da temperatura. Os resultados deste tipo de análise são plotados em curvas cuja abscissa contém as medidas de temperatura e a ordenada a massa residual, apresentando assim a degradação térmica do material. Deve-se destacar que a curva *TGA* não retorna transições cristalinas que não envolvam perdas de massa. A termogravimetria derivativa (*DTG*) apresenta como resposta a taxa de variação de massa, sendo muito útil nos casos de sobreposições de eventos térmicos não aparentes na curva *TGA*. Ressalta-se que as análises combinadas de *TGA* e *FTIR*

forneem informações quantitativas (*TGA*) e qualitativas (*FTIR*) dos constituintes dos materiais estudados.

As curvas termogravimétrica (*TG*) e termogravimétrica derivada (*DTG*) foram obtidas em um módulo termogravimétrico Hi-Res TGA 2950 (TA Instruments) acoplado a um analisador térmico TA2000 (TA Instruments), utilizando taxa de aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera dinâmica de N₂, com vazão de gás da ordem de 50 mL/min. A temperatura máxima de ensaio foi de 900°C, sendo utilizado suporte de amostra de alumina.

2.2.1.3 Análise termodinâmico-mecânica (*DMTA*)

Na análise termodinâmico-mecânica (*DMTA*) a amostra é submetida a uma tensão ou deformação oscilatória, fornecendo desta forma o módulo dinâmico do material. No presente trabalho foi utilizado o modo de torção, por representar um estado múltiplo de tensões. Por ser uma técnica dinâmica, a resposta do material em função da temperatura é desdobrada em três componentes; neste caso, módulo de cisalhamento (*G'*), módulo de perda (*G''*) e amortecimento ou tan delta (*G''/G'*).

Conforme explanado por Paiva *et al.* (2006) a técnica de *DMTA* apresenta sensibilidade de aproximadamente 3 ordens de grandeza superior às técnicas convencionais tais como *DSC* e *TMA*¹⁵, isto é interessante para determinação da temperatura de transição vítrea (*T_g*) em compósitos devido a interferência das fases presentes no material que tornaria a medida imprecisa nestas técnicas. Desta forma, a técnica de *DMTA* é muito atrativa para avaliar propriedades térmicas (*T_g*, por exemplo) e propriedades mecânicas (módulo de cisalhamento, por exemplo) do material analisado.

As análises termodinâmico-mecânicas (*DMTA*) foram realizadas em um reogoniômetro Ares da Rheometrics, sendo utilizado o modo de torção, deformação de 0,1%, frequência de oscilação de 1,0 Hz e taxa de aquecimento de 3°C/min.

¹⁵ *DSC* – differential scanning calorimeter; *TMA* – thermo-mechanical analysis.

2.2.1.4 Temperatura de amolecimento de Vicat

A temperatura de amolecimento de Vicat foi determinada segundo as especificações da ASTM D 1525 (2006). Esta análise permite se obter a rigidez a penetração de determinado material, onde uma agulha de ponta chata (com área de $1,0 \pm 0,015 \text{ mm}^2$) com uma massa específica é colocada em contato direto com a amostra. A massa aplicada pode ser de $10 \pm 0,2 \text{ N}$ ou $50 \pm 1,0 \text{ N}$. Permite-se utilizar as taxas de aquecimento de $50 \pm 5^\circ\text{C/h}$ ou $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$. No presente trabalho os corpos-de-prova foram ensaiados com os dois tipos de carregamentos permitidos e com taxa de aquecimento de $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$.

Como meio de transferência de calor foi utilizado um banho de óleo de silicone em um equipamento HDT 6 VICAT P/N 6921 da CEAST. Este meio tinha que permitir que a amostra estivesse imersa 35 mm acima da superfície de transferência de calor, além de ter baixa viscosidade à temperatura ambiente, pois os resultados sofrem influência da difusividade térmica do meio (ASTM D 1525, 2006).

2.2.2 Ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura

Visto que ficou evidenciado nas análises de caracterização de tubos e adesivos que estes últimos possuíam desempenho termo-mecânico insatisfatório quando comparados com os primeiros, optou-se por realizar ensaios de tração uniaxial de adesivos com variação de temperatura nas misturas que apresentaram melhor compatibilidade com o tubo, a saber: adesivo nacional 50%A-50%B e adesivo importado 60%A-40%B, que por sua vez eram as misturas preconizadas pelos respectivos fabricantes. Ressalta-se que estas foram moldadas dentro do tempo de aplicação (*pot life*) estipulado por cada um dos fabricantes. Os corpos de prova foram removidos dos moldes após 24 horas de moldagem, sendo lixados para remoção de defeitos de superfície. Para a confecção dos corpos-de-prova foram preparados, por meio de polimerização a frio, 3 moldes de borracha siliconada, com 6 cavidades cada um, como mostra a Figura 22.

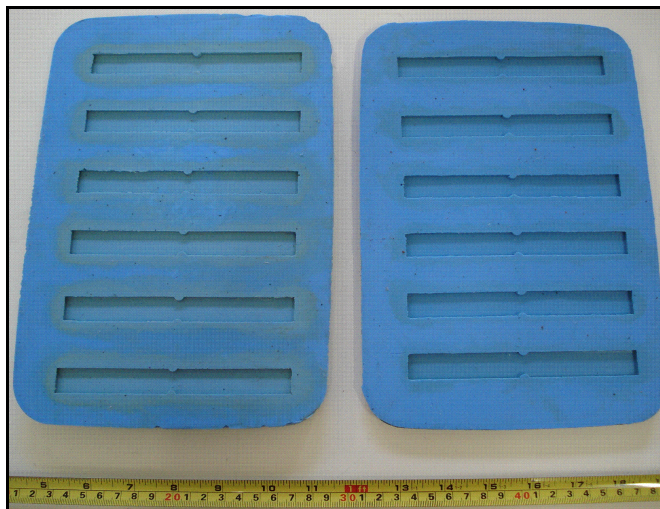


Figura 22 – Moldes para a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios de tração uniaxial em adesivos com variação de temperatura.

Nos ensaios de tração uniaxial de adesivos a confecção de corpos-de-prova atenderam às prescrições normativas da ASTM D 638 (2003). Conforme a Figura 23, os corpos-de-prova tiveram entalhes em forma de meia circunferência na região de aquecimento, localizando desta forma a região de ruptura. Além disso, os entalhes tiveram a finalidade de evitar os efeitos de pré-carga, principalmente nas extremidades devido à fixação das garras da prensa de ensaio.

Os corpos-de-prova tinham 140 mm de comprimento, 15 mm de largura da seção maior, 11 mm de largura da seção menor (entalhe) e 4 mm de espessura. Contudo, após a desmoldagem os corpos-de-prova sofreram lixamento para remoção de defeitos de superfície, reduzindo assim a espessura para cerca de 2,5 a 3,0 mm.

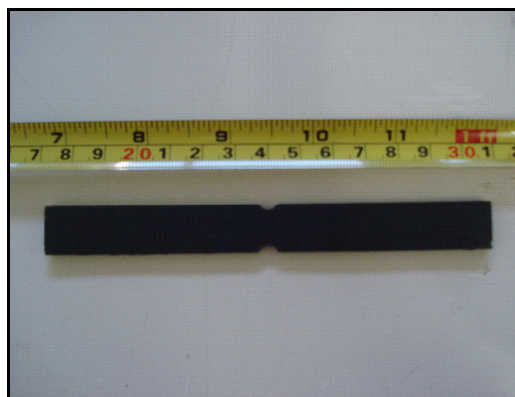


Figura 23 – Corpo-de-prova de adesivo para os ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura.

Para a execução dos ensaios de tração uniaxial de adesivos dos diferentes fabricantes foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca INSTRON modelo 5582 com capacidade de carga igual a 100 kN. A velocidade de ensaio utilizada foi de 2 mm/min. Para o aquecimento dos corpos-de-prova foi acoplado à máquina de ensaios um forno resistivo com as extremidades isoladas e a temperatura deste foi medida por meio de um termopar inserido no forno, localizado próximo ao entalhe conforme visualizado na Figura 24.

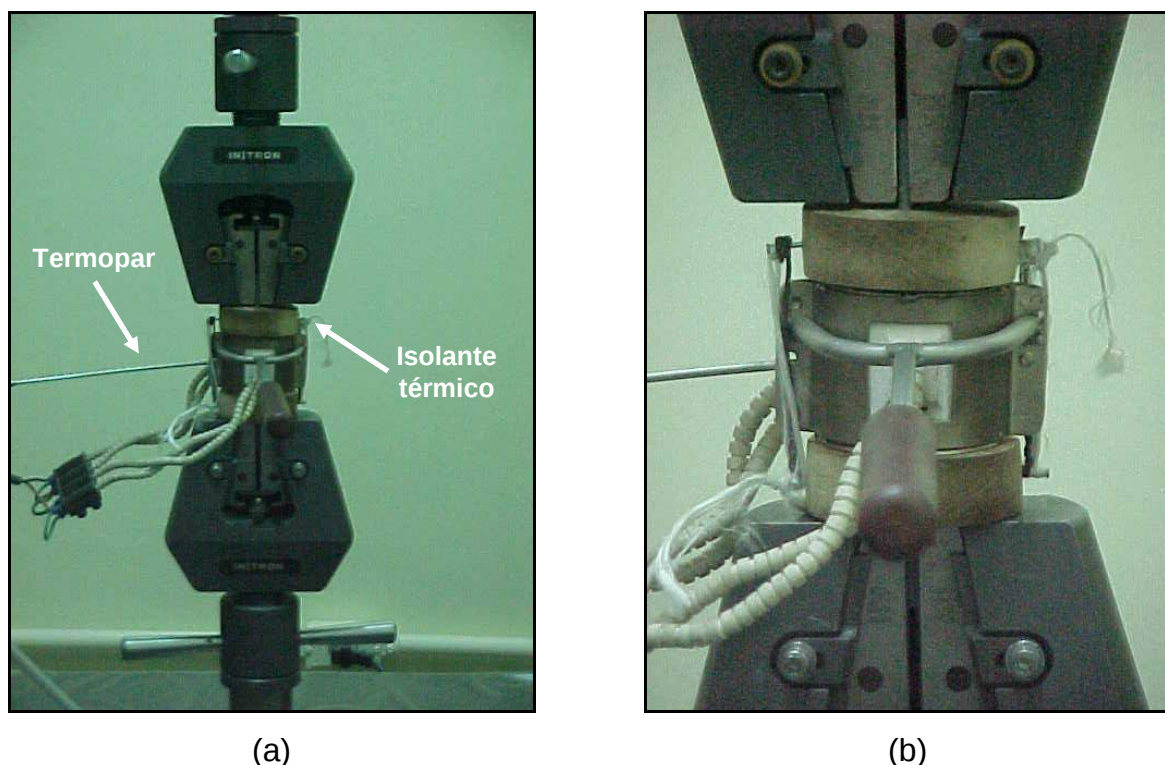


Figura 24 – Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura: (a) forno resistivo acoplado; (b) detalhe do forno.

A fim de se evitar a perda de calor e facilitar a estabilização da temperatura do corpo-de-prova, foi utilizada uma manta térmica de fibra de vidro para envolver o forno resistivo, como pode ser observado na Figura 25a. A Figura 25b apresenta a ruptura do corpo-de-prova no entalhe.

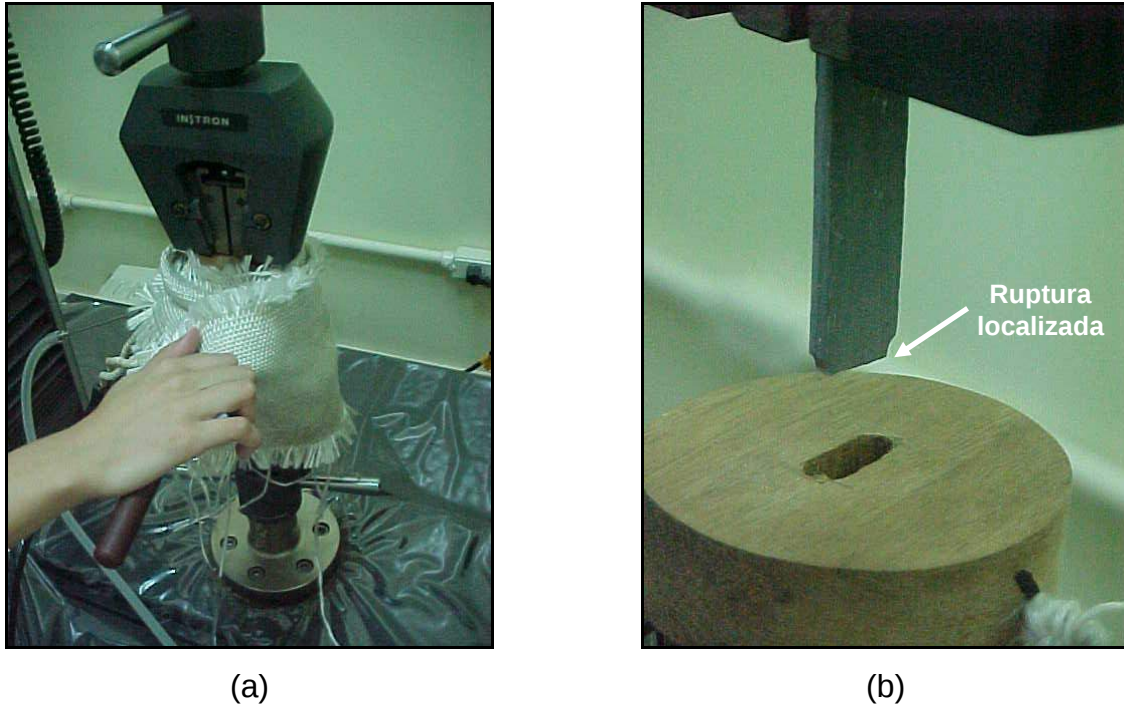


Figura 25 – Ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura: (a) detalhe da manta térmica; (b) detalhe da ruptura no entalhe.

Nos ensaios de tração de adesivos, a máquina de ensaios INSTRON forneceu curvas $P-\Delta$, isto é, carga-deslocamento. A deformação ou alongamento dos corpos-de-prova durante o ensaio foi determinada pela razão entre o deslocamento obtido (Δ) a cada 0,1 s pelo comprimento livre do corpo-de-prova (l_0), isto é, comprimento inicial do corpo-de-prova (L) excluído as extremidades onde foram fixadas as garras. Devido à dificuldade em se determinar a tensão do corpo-de-prova durante o ensaio, optou-se por utilizar a tensão na face de ruptura da amostra.

Para ruptura no entalhe, a tensão nominal (σ_{nom}) e a tensão na face de ruptura da amostra ($\sigma_{máx}$) foram determinadas da seguinte forma:

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{h(H-2r)} \quad (8)$$

$$\sigma_{máx} = K_t \sigma_{nom} \quad (9)$$

Onde, h , H , L são, respectivamente, espessura, largura e comprimento dos corpos-de-prova. P é a carga de ruptura da amostra e r se refere ao raio da meia

circunferência no ponto médio de cada lado dos corpos-de-prova (Figura 23). O parâmetro K_t é o fator de concentração de tensão, onde para os casos em que o entalhe tem forma de semi-circunferência, Pilkey *et al.* (1997) sugerem a seguinte equação:

$$K_t = 3,065 - 3,472(2r/H) + 1,009(2r/H)^2 - 0,405(2r/H)^3 \quad (10)$$

Para ruptura fora do entalhe, a tensão nominal (σ_{nom}) e a tensão na face de ruptura da amostra ($\sigma_{máx}$) foram determinadas da seguinte forma:

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{hH} \quad (11)$$

$$\sigma_{máx} = K_t \sigma_{nom} = \sigma_{nom} \quad (12)$$

Por outro lado, o módulo de elasticidade (E) de cada amostra foi determinado selecionando-se pontos experimentais das curvas tensão-deformação, que estavam, por sua vez, dentro da região elástica, ou seja, obedecendo a Lei de Hooke. Tais pontos foram interpolados por uma reta do tipo $\sigma = a\varepsilon + b$ que representava o melhor ajuste (Figura 26), onde a corresponde ao módulo elástico (E , em GPa). Esta propriedade é de fundamental importância, pois fornece a rigidez dos sistemas ao longo do eixo tracionado.

Para a determinação da tensão de escoamento foi traçada a reta passante pela deformação $\varepsilon = 0,10\%$, paralela àquela citada anteriormente, conforme explanado por Higgins (1982), até atingir a curva tensão-deformação. O respectivo ponto de interseção entre a reta e a curva é lido no eixo vertical, sendo a tensão de escoamento (σ_{esc} , em MPa). Esta propriedade é de grande importância, pois a partir dela o material passa ao regime elasto-plástico, onde ocorrem os danos permanentes, que causam parte das falhas nas juntas coladas. A Figura 26 ilustra como foram obtidos tais parâmetros, onde os valores de deformação estão divididos por 1000 e o coeficiente angular do trecho linear ou módulo de elasticidade, em GPa.

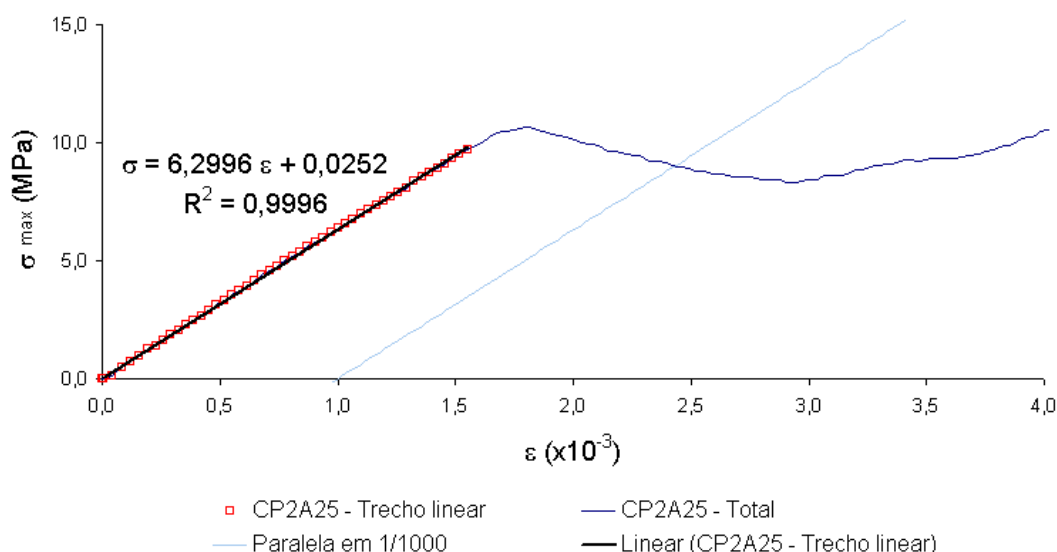


Figura 26 – Exemplo de obtenção do módulo elástico (E) e da tensão de escoamento (σ_{esc}) em no trecho inicial da curva σ - ε do corpo de prova CP2A25.

A Tabela 17 apresenta a nomenclatura adotada para as amostras analisadas. Destaca-se que os ensaios foram conduzidos às temperaturas de 25, 55, 85 e 115°C. Cabe ressaltar que para cada temperatura foram ensaiados 4 corpos-de-prova, logo, foram moldados 16 corpos-de-prova por fabricante.

Tabela 17 – Nomenclatura das amostras analisadas.

Temperatura (°C)	Nomenclatura ¹⁶	
	Edra do Brasil	Ameron International
25	CPaE25	CPaA25
55	CPaE55	CPaA55
85	CPaE85	CPaA85
115	CPaE115	CPaA115

Desta forma, de cada corpo-de-prova ensaiado foi obtida uma curva tensão-deformação (σ - ε). De cada curva foi possível a obtenção, nas temperaturas diversas, das tensões de escoamento, da tensão de ruptura, das deformações respectivas a estas tensões, bem como do módulo de elasticidade. Dos parâmetros obtidos, na investigação dos efeitos da temperatura na resistência à tração e módulo de

¹⁶ A letra a significa o número do corpo-de-prova, ou seja, 1, 2, 3 e assim por diante.

elasticidade, fez-se possível confirmar através deste ensaio o desempenho termomecânico dos adesivos utilizados em juntas coladas de tubulações PRFV.

2.2.3 Ensaios hidrostáticos com variação de temperatura

Para a execução dos ensaios hidrostáticos com variação de temperatura foi necessário o desenvolvimento de um equipamento capaz de simular as condições encontradas *in loco*, isto é, a combinação de pressão e elevadas temperaturas, diferentemente dos equipamentos usuais para o teste de estanqueidade padrão apresentado pela ASTM D1599 (2005) que preconizam somente a variável pressão. Para tanto, neste tópico será apresentado o equipamento desenvolvido, a instrumentação para aquisição dos parâmetros de interesse (temperatura, pressão e deslocamentos) e em seguida como foram efetuados os ensaios.

2.2.3.1 Equipamento de ensaios hidrostáticos

As Figuras 27 e 28 apresentam um panorama e um diagrama do equipamento desenvolvido para a execução dos ensaios hidrostáticos com variação de temperatura. As Figuras 29 e 30 apresentam, por sua vez, as legendas necessárias ao bom entendimento do funcionamento do mesmo. O equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura consta de sistema de aquecimento para elevação da temperatura da água, além de sistema de circulação e pressurização desta acoplado a um sistema de aquisição de dados.

No equipamento as linhas cheias azuis representam as mangueiras de água quente do sistema, que são compostas pelas Linhas C, D, E, F, G, H, I, J e K (Figuras 28 a 30), sendo estas da marca AEROQUIP com temperatura e pressão de serviço de, respectivamente, 121°C e 13,8 MPa. Ressalta-se que as conexões são todas de aço (tês, joelhos, nipples, terminais, e outros) e da marca AEROQUIP. Por outro lado, as válvulas do tipo agulha são da marca MIPEL e as válvulas tipo esfera são da marca WOG.

Nas Figuras 27 a 30 destaca-se que as linhas vermelhas são cabos de aquisição de dados (temperatura, pressão e deslocamentos) enquanto as linhas verdes representam a alimentação elétrica de diversos pontos do equipamento.

A linha tracejada azul representa a linha de água fria ou de abastecimento (Linha B). A linha pontilhada preta representa a alimentação de ar comprimido da bomba hidropneumática (BH-1) instalada em um sistema denominada de *SKID*, sendo responsável pela pressurização do sistema (Figura 31). Nas linhas supracitadas é apresentado o fluxo de água e de ar comprimido. A bomba hidropneumática é alimentada por um compressor da marca SCHULZ, modelo twister MAS 8.1/25 com vazão 228 litros/min, pressão máxima de 0,8 MPa e potência de 2 hp (Figura 33).

Para circulação de água quente foi utilizada uma bomba centrífuga elétrica (BCE) da marca DANCOR, modelo CP-4R VITON, com motor monofásico, potência de $\frac{1}{2}$ CV, tensão de 110V, temperatura máxima do fluido de 95°C, pressão de sucção máxima de 6 mca¹⁷, pressão de saída de 23 mca e vazão máxima de 8,6 m³/h (Figura 31).



Figura 27 – Vista panorâmica do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.

¹⁷ Destaca-se que 1 bar = 0,1 MPa = 10,20 mca.

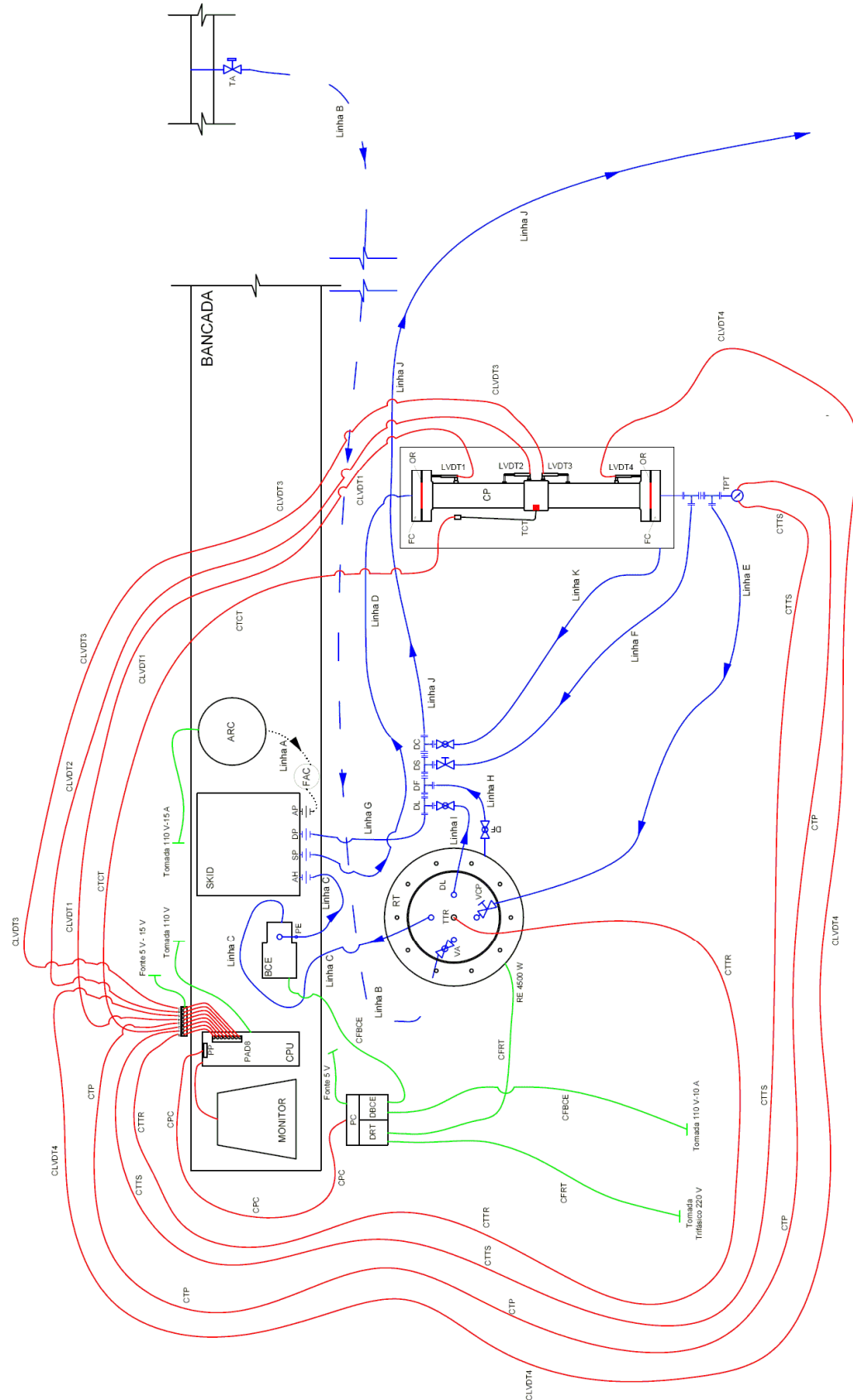


Figura 28 – Diagrama do equipamento de ensaio hidrostático.

LEGENDA	
	TORNEIRA DE ABASTECIMENTO (TA)
	VÁLVULA ESFERA
	VÁLVULA AGULHA
	TRANSDUTOR
	TÊ DE EXTREMIDADE FÊMEA
	UNIÃO OU BULK HEAD
	INDICADOR DE FLUXO D'ÁGUA
	MANGUEIRA DE ÁGUA FRIA
	MANGUEIRA DE ÁGUA QUENTE
	MANGUEIRA DE AR COMPRIMIDO
	CABOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS
	CABOS DE FORÇA
BCE	BOMBA CENTRÍFUGA ELÉTRICA
BH-1	BOMBA HIDROPNEUMÁTICA
CPU	COMPUTADOR
ARC	INJETOR DE AR COMPRIMIDO
FAC	FILTRO DE AR COMPRIMIDO
RT	RESERVATÓRIO TÉRMICO
CP	CORPO DE PROVA DE PRFV
PRFV	PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO
PAD8	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 8 CANAIS (0-5 V / 4-20 mA)
LVDT1	TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO DA FLANGE 1 RELATIVO AO TUBO
LVDT2	TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO DO TUBO RELATIVO A LUVA
LVDT3	TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO DO TUBO RELATIVO A LUVA
LVDT4	TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO DA FLANGE 2 RELATIVO AO TUBO
TTR	TRANSDUTOR DE TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO
TCT	TRANSDUTOR DE CONTATO DE TEMPERATURA
TPT	TRANSDUTOR DE PRESSÃO E TEMPERATURA
RE	RESISTÊNCIA ELÉTRICA
PC	PLACA DE CONTROLE
PP	PLACA PARALELA
DBCE	DISPOSITIVO DE CONTROLE DA BOMBA CENTRÍFUGA ELÉTRICA
DRT	DISPOSITIVO DE CONTROLE DO RESERVATÓRIO TÉRMICO
Fonte 5V	FONTE DE ALIMENTAÇÃO EXTERNA (5 V) PARA A PLACA DE CONTROLE (PC)
Fonte 5 V - 24 V	FONTE DE ALIMENTAÇÃO (24 V) PARA O TRANSDUTOR DE PRESSÃO (TP) E ALIMENTAÇÃO (5 V) PARA OS LVDTs

Figura 29 – Legenda A do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.

LEGENDA	
FC	FLANGE CEGO DE AÇO INOX (ROSCA FÊMEA DE 1/2" NPT)
OR	O-RING DE VITON (MAIOR QUE 4")
AH	ALIMENTAÇÃO HIDRÁULICA (FÊMEA 3/4" NPT)
SP	SAÍDA DE PRESSÃO (FÊMEA 1/4" NPT)
DP	DRENO DE PRESSÃO (FÊMEA 1/4" NPT)
AP	ALIMENTAÇÃO PNEUMÁTICA (FÊMEA 1/2" NPT)
DL	DRENO LADRÃO
DF	DRENO DE FUNDO
PE	PONTO DE ESCORVA
VCP	VÁLVULA CONTROLADORA DE PRESSÃO
DS	DRENO DE SATURAÇÃO
VA	VÁLVULA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA FRIA
LINHA A	LINHA DE AR COMPRIMIDO
LINHA B	LINHA DE ABASTECIMENTO OU ÁGUA FRIA
LINHA C	LINHA DE ÁGUA QUENTE DE ALIMENTAÇÃO HIDRÁULICA (3,00m)
LINHA D	LINHA DE ÁGUA QUENTE DE SAÍDA DE PRESSÃO (4,00m)
LINHA E	LINHA DE ÁGUA QUENTE DE RETORNO (4,00m)
LINHA F	LINHA DE ÁGUA QUENTE DE SATURAÇÃO DO CP (4,00m)
LINHA G	LINHA DE ÁGUA QUENTE DO DRENO DE PRESSÃO (2,00m)
LINHA H	LINHA DE ÁGUA QUENTE E FRIA DRENO DE RT (2,00m)
LINHA I	LINHA DE ÁGUA QUENTE E FRIA DO DL (2,00m)
LINHA J	LINHA DE ÁGUA QUENTE E FRIA COLETORA DOS DRENOS (7,00m)
LINHA K	LINHA DE ÁGUA QUENTE COLETORA DA CAIXA DE PROTEÇÃO (2,50m)
CTP	CABO DE DADOS DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO
CTTS	CABO DE DADOS DO TRANSDUTOR DE TEMPERATURA DE SAÍDA
CPC	CABO DE DADOS DA PLACA DE CONTROLE
CTCT	CABO DE DADOS DO TRANSDUTOR DE CONTATO DE TEMPERATURA
CTTR	CABO DE DADOS DO TRANSDUTOR DE TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO
CLVDT1	CABO DE DADOS DO LVDT1
CLVDT2	CABO DE DADOS DO LVDT2
CLVDT3	CABO DE DADOS DO LVDT3
CLVDT4	CABO DE DADOS DO LVDT4
CFRT	CABO DE FORÇA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO RESERVATÓRIO
CFBCE	CABO DE FORÇA DA BOMBA CENTRÍFUGA ELÉTRICA

Figura 30 – Legenda B do equipamento de ensaio hidrostático com variação de temperatura.

A Figura 31 apresenta um kit denominado de *SKID* de pressurização fornecido pela FLUTROL, possuindo uma bomba hidropneumática (BH-1) da marca HASKEL, modelo DSTV-25, sendo o número a relação entre a área do pistão de ar e a área do pistão hidráulico, isto é, a pressão de saída hidráulica (PS) é igual ao produto da razão da bomba (R) pela pressão de entrada de ar (PA), ou seja:

$$PS \approx R \cdot PA = 25 \cdot PA \quad (13)$$

Destaca-se ainda que a bomba hidropneumática (BH-1) possui temperatura máxima de operação de 135°C, pressão contínua máxima de trabalho de 27,7 MPa, sendo necessário 1,0 MPa de ar para dar partida no motor desta. A pressão de operação ideal desta bomba gira em torno de 17,3 MPa a 20,8 MPa. Além disso, o *SKID* de ensaio possui filtro de pressão e filtro regulador (FH-1) da marca NORGREN, válvula agulha (VA-1) da marca BUTECH, válvula esfera (VEA-1 e VEB-1) da marca F.I.V., manômetros de pressão (MP-1) da marca ASHCROFT com escala de 0 a 35,0 MPa e de ar comprimido (MA-1) da marca FLUTROL com escala de 0 a 0,9 MPa (Figuras 31 e 32).



Figura 31 – Bomba centrífuga elétrica e *SKID* de ensaio hidrostático.

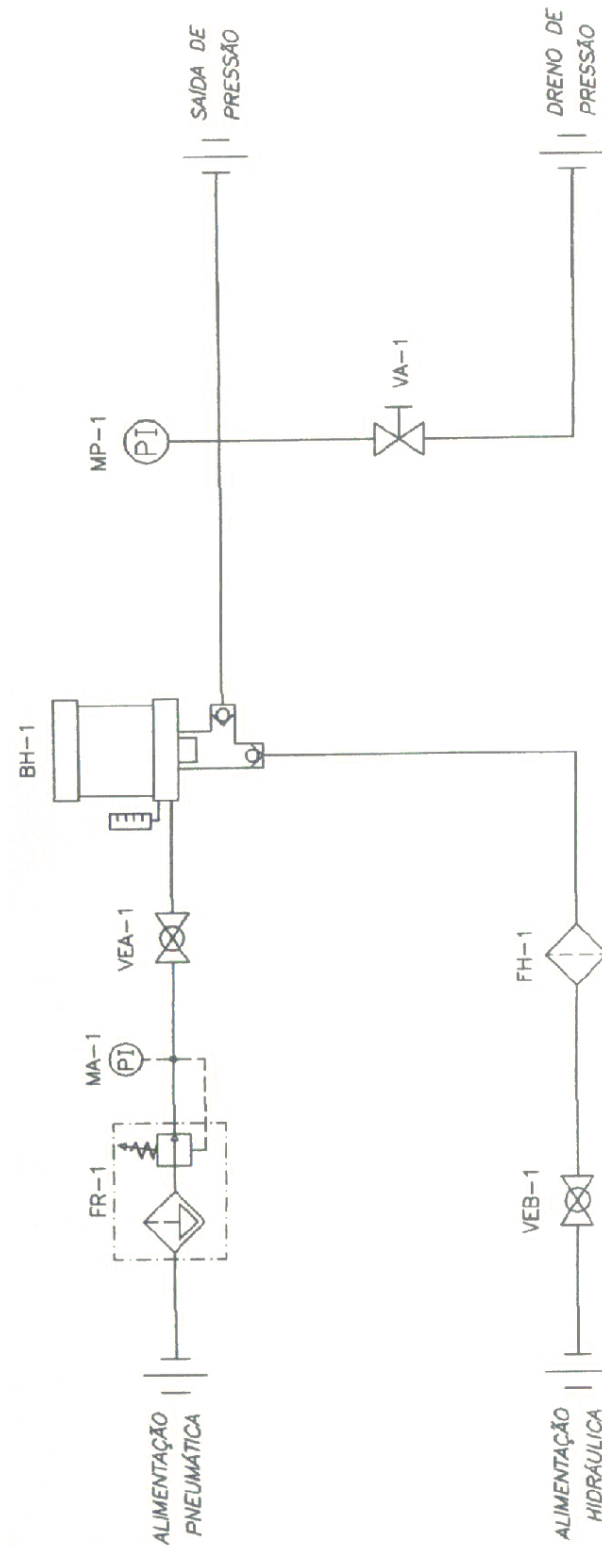


Figura 32 – Esquema do SKID de ensaio hidrostático (adaptado de Edra do Brasil, 2006b).

Das Figuras 27, 28 e 33 nota-se que o reservatório térmico (RT) foi confeccionado em aço possuindo uma resistência elétrica de 4500W. O reservatório ainda possui pontos de entrada e saída de água, pois na circulação de água quente a mesma retorna ao reservatório para um novo aquecimento. Após a montagem do reservatório térmico, o mesmo foi envolto com uma manta de fibra de vidro para evitar perdas térmicas.

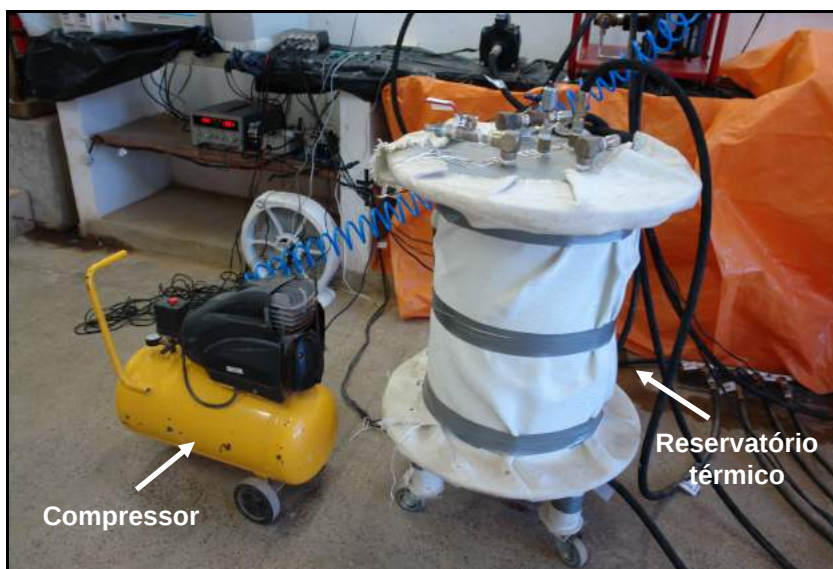


Figura 33 – Reservatório montado e envolto com manta isolante de fibra de vidro e compressor de ar comprimido.

2.2.3.2 Instrumentação e aquisição de dados

A instrumentação do equipamento de ensaios hidrostáticos englobou a aquisição de dados que coletavam as informações provenientes do termopar do reservatório térmico (TTR) que media a temperatura da água contida neste, do termopar de contato (TCT) que media a temperatura na face da luva do corpo-de-prova de ensaio, do termopar de contato do tubo (TCTA) que media a temperatura na face do tubo do corpo-de-prova, do termopar de saída (TTS) que media a temperatura do fluido no interior do corpo-de-prova, do transdutor de pressão (TP) que media este parâmetro no

interior do corpo-de-prova, além dos *LVDTs*¹⁸ que mediam os deslocamentos relativos nas juntas (Figuras 28 a 30).

Com relação ao monitoramento de temperatura, deve-se ressaltar que o termopar do reservatório térmico (TTR) é da marca ECIL tipo K (cromel-alumel, medição de até 1200°C) com proteção mineral, haste com proteção de inox 304 L com 300 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro, além de buçim de aço inox 304 com rosca de conexão de ½" NPT. Diferentemente do anterior, o termopar de contato (TCT) possui haste de 400 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro e não possui buçim de conexão. O termopar de contato do tubo (TCTA) é da marca ECIL, possuindo 100 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro. O transdutor de temperatura de saída (TTS) é combinado com transdutor de pressão (TP), possuindo sensor tipo J com faixa de medição até 350°C sendo da marca GNEUSS.

Todas as saídas de sinal de temperatura eram coletadas em mV; por sua vez, estes valores eram convertidos para °C no momento da leitura através do suporte da placa de aquisição de dados conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Algumas especificações de sensores de temperatura segundo fabricante (adaptado de Sensoray, 1999).

Tipo de sensor de temperatura	Faixa de medição (°C)	Resolução (°C)	Acurácia (°C)
J	-210 a +760	0,1	0,6
K	-270 a +1360	0,1	1,0

Com relação ao monitoramento de pressão, o transdutor de pressão (TP) além de possuir sensor de temperatura integrado tipo J (Tabela 18), possui precisão de medição de $\pm 1,0\%$ do valor final, sensibilidade de 2mV/V, faixa de medição entre 0 e 40,0 MPa, rosca de conexão de ½-20 UNF-2A com um adaptador com esta rosca interna e rosca externa métrica tipo M16 e, ainda amplificador de sinal integrado¹⁹ para os valores de pressão com sinais entre 4 e 20 mA.

Para padronizar a leitura em mV, foi utilizado no canal referente à pressão um resistor de precisão de 1% e 220 Ω . Desta forma, o sinal de saída do transdutor de

¹⁸ Do inglês, *Linear Variable Differential Transducer*.

¹⁹ Cabe salientar que o amplificador de sinal integrado foi alimentado com uma tensão de 24V.

pressão poderia ser medido entre ²⁰880 mV e 4400 mV. Ressalta-se que a saída de sinal deste transdutor é linear, portanto uma medida de pressão pode ser obtida por interpolação linear sabendo que 880 mV equivale a 0 MPa e 4400 mV equivale a 40,0 MPa.

No que tange a mensuração dos deslocamentos nas juntas dos corpos-de-prova, os *LVDTs* utilizados foram da marca GEFTRAN, sendo que aqueles que mensuravam os deslocamentos nas juntas extremas (*LVDT1* e *LVDT4*) possuíam escala de 0 a 10 mm e aqueles que mensuravam os deslocamentos nas juntas intermediárias (*LVDT2* e *LVDT3*) possuíam escala, respectivamente, entre 0 e 50 mm e entre 0 e 25 mm (Figura 28).

Deve-se ressaltar que os *LVDTs* são resistências variáveis que correlacionam deslocamento com diferença de potencial elétrico. Desta forma, a tensão fornecida²¹ por meio de fonte externa ($V_{fornecida}$) dividida pelo máximo deslocamento permitido pelo equipamento (D_{max}) fornece uma relação (R), cujo seu inverso multiplicado pela tensão lida (V_{lida}) no momento de um deslocamento (D_{obtido}) fornece a magnitude do mesmo. Em suma:

$$D_{obtido} = V_{lida} / R \quad \text{e} \quad R = V_{fornecida} / D_{max} \quad (14)$$

Conforme a Figura 34, no monitoramento de dados, os valores obtidos pelos transdutores eram coletados em uma caixa distribuidora de 8 canais que levava estas informações a uma placa de aquisição de dados (PAD8) da marca SENSORAY, modelo 618, versão FW 2.25, onde os sinais elétricos coletados eram traduzidos em um *software* de sensoramento de dados desenvolvido nesta dissertação.

Cabe destacar que o acionamento da bomba centrífuga elétrica (BCE) e a resistência térmica do reservatório (RT) eram acionados por meio de uma placa de controle (PC) alimentada por uma fonte externa de 5V (Figura 34), que por sua vez enviava as informações através da porta paralela do computador (PP) para o *software* de sensoramento de dados, indicando assim o momento da circulação de água quando requisitada, e da ligação ou não da resistência térmica de acordo com a temperatura medida pelo termopar TTR, monitorada também no *software* de sensoramento.

²⁰ Lembrando que $V = R \cdot i$, onde V é tensão, R é resistência e i é corrente.

²¹ Cabe ressaltar que os *LVDTs* foram alimentados com uma tensão de 5V.

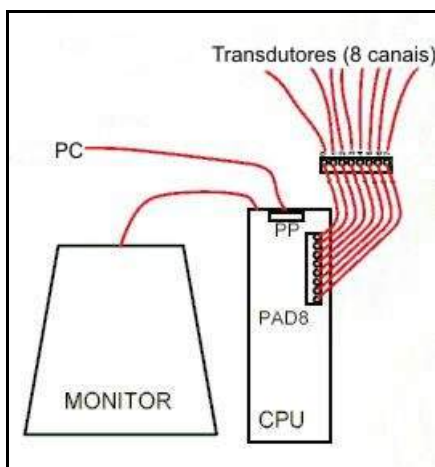


Figura 34 – Esquema da caixa coletora de canais e placa de aquisição de dados (PAD8).

A Figura 35 apresenta o dispositivo de controle da bomba centrífuga elétrica (DBCE) acionado pela placa de controle (PC), destacando que esta se encontra inserida dentro da caixa onde estão localizadas as chaves de acionamento DBCE e DRT (Figuras 35 e 36).

No caso da bomba centrífuga elétrica, da Figura 35 nota-se a presença de um contator necessário para acionar ou não a ciclagem da bomba centrífuga elétrica por meio da ação da placa de controle (PC), através da porta paralela (PP) do computador. Da mesma forma ocorre com o contator do dispositivo de controle da resistência térmica (DRT) apresentado na Figura 36.

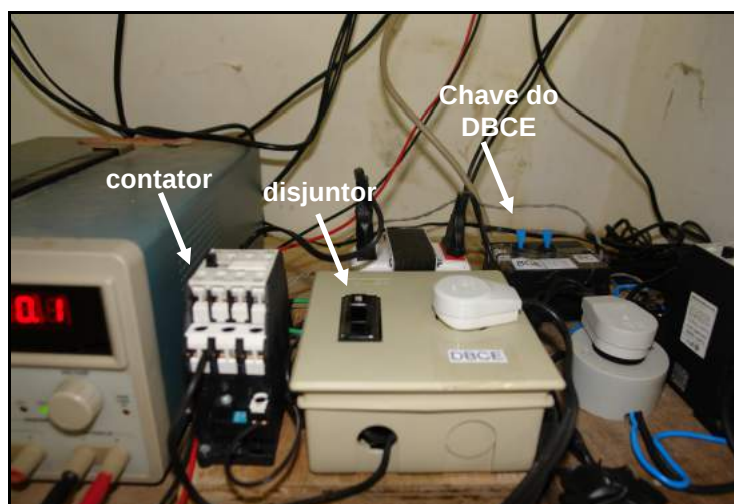


Figura 35 – Detalhe do dispositivo de controle da bomba centrífuga elétrica (DBCE).

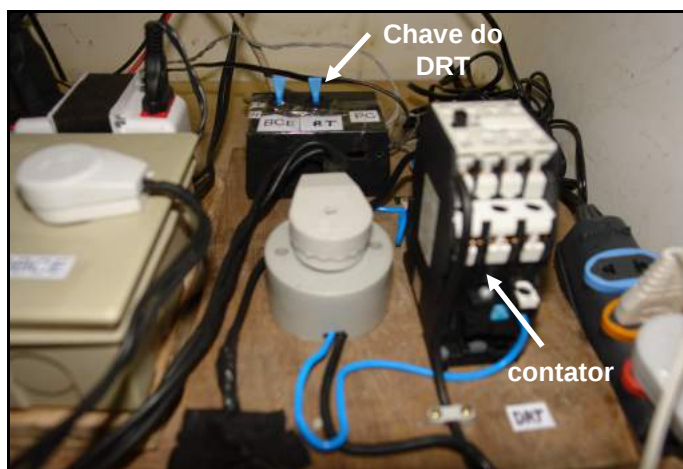


Figura 36 – Detalhe do dispositivo de controle da resistência elétrica (DRT).

As Figuras 37 e 38 apresentam o *software* de leitura dos *LVDTs* e de sensoramento de dados desenvolvido na presente dissertação. Estes foram confeccionados em ambiente de programação Visual Basic 5. No *software* de leitura dos *LVDTs* são medidas a tensão inicial (V_{lida}) de cada aparelho em volts e a partir da Equação 35 a posição inicial (D_{obtido}) em mm. Estes valores são armazenados em arquivos de dados, em outras palavras, a posição dos *LVDTs* é zerada. Assim, qualquer movimento da haste pode ser monitorado.

No *software* de sensoramento de dados, na guia Valores Lidos são monitorados a cada segundo a temperatura na saída do corpo-de-prova (TTS), a temperatura no contato da luva do corpo-de-prova (TCT), a pressão hidrostática no corpo-de-prova (TP), além dos deslocamentos medidos pelos *LVDTs*. Os máximos valores até então obtidos são apresentados também na tela do *software*. Na guia Bomba, nota-se o tempo desejado de circulação de água da bomba BCE em minutos, isto é, tempo no qual a bomba liga e desliga, além do *status* desta.

Na guia Reservatório nota-se a temperatura em que se deseja que seja realizado o ensaio, além da temperatura medida em tempo real pelo termopar TTR, a resistência liga e desliga pela ação da placa de controle (PC) de acordo com a tolerância desejada acima e abaixo do valor da temperatura desejada. Em tempo real também são plotados gráficos pressão *versus* tempo, temperatura de saída (TTS) *versus* tempo e temperatura de contato (TCT) *versus* tempo para acompanhamento do ensaio. Ressalta-se que todos os canais são armazenados em diferentes arquivos de dados.

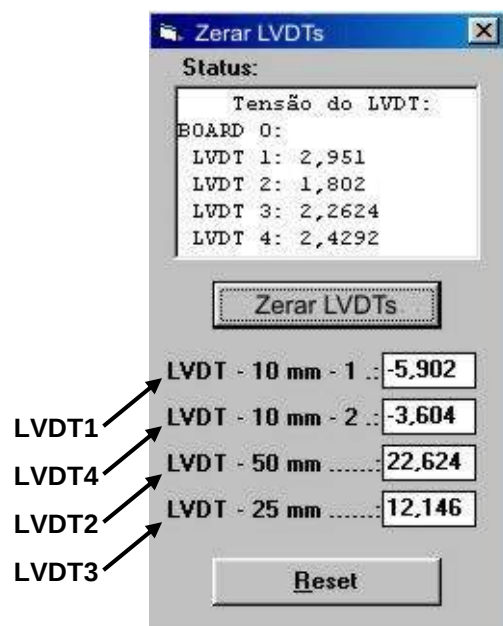


Figura 37 – Software de leitura dos LVDTs.

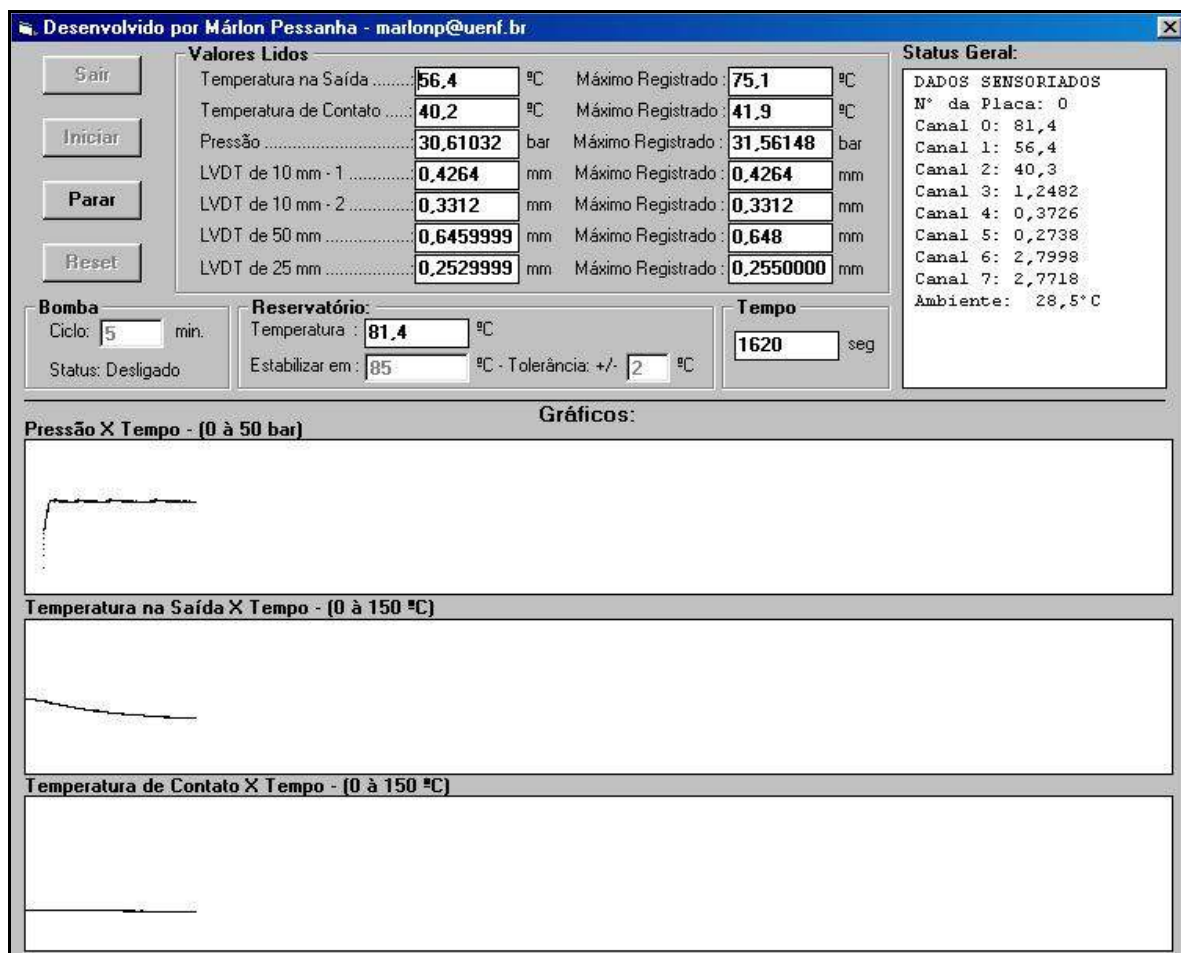


Figura 38 – Software de sensoriamento de dados.

2.2.3.3 Desenvolvimento dos ensaios hidrostáticos

Para os ensaios hidrostáticos com variação de temperatura foram montados corpos-de-prova de acordo com as Figuras 39 a 44. Os corpos-de-prova colados foram montados pelos respectivos fabricantes com dois segmentos de tubo de PRFV de 100 mm de diâmetro e de 550 mm de comprimento unidos por meio de adesivo recomendado e luvas. Nas extremidades foram colados flanges para fixação das tampas cegas de execução do ensaio. Deve-se deixar claro que os fabricantes executaram a montagem dos corpos-de-prova já que somente estes estão qualificados para tal procedimento.

Cabe destacar que no caso do fabricante internacional, por opção do fabricante o adesivo utilizado foi o PSX-60 (Figuras 43 e 44), embora este tipo de adesivo não venha sendo empregado em juntas coladas da série 7000M na Petrobras.



(a)



(b)

Figura 39 – Corpos-de-prova nacionais para ensaio hidrostático: (a) junta colada e (b) junta laminada.

Ainda de acordo com as Figuras 39 a 42, para fins de comparação, foram ensaiados também corpos-de-prova laminados provenientes do fabricante nacional,

cujo detalhe da laminação pode ser visualizado na Figura 40b. Nota-se que no caso de corpos-de-prova laminados a união entre flange e tubo não é laminada, sendo monolítica (Figura 42).

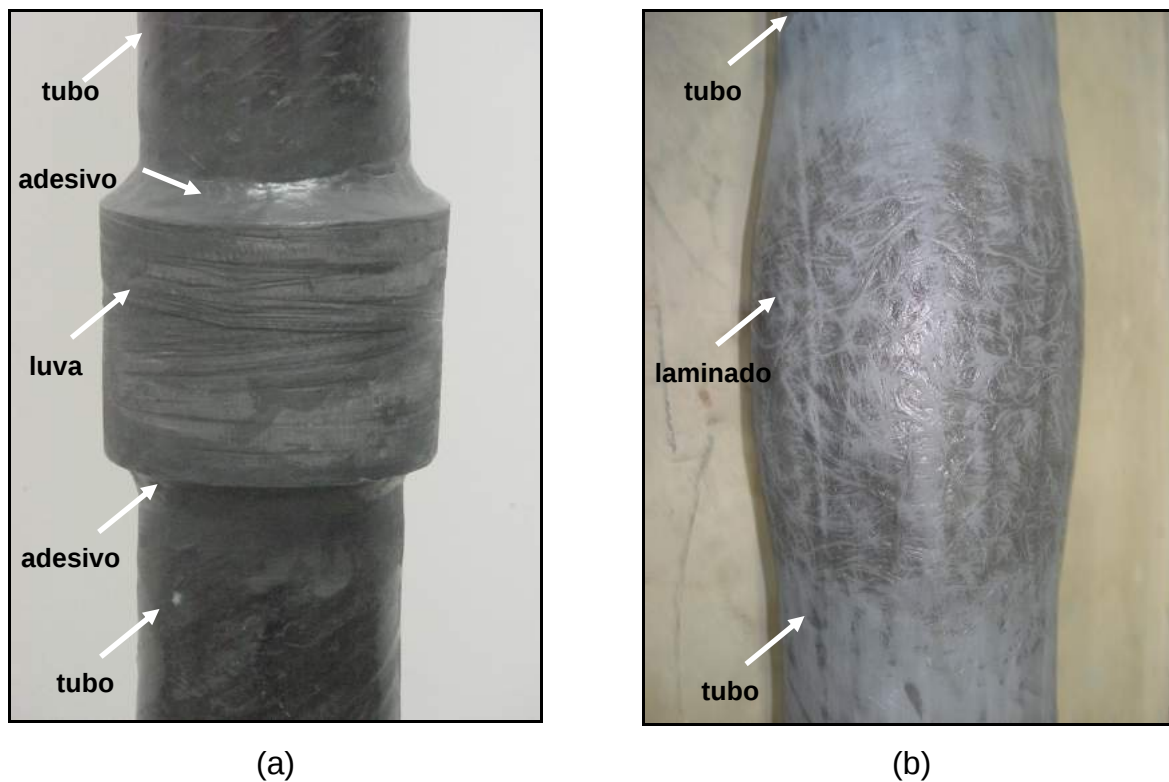


Figura 40 – Detalhe da união intermediária dos corpos-de-prova nacionais: (a) juntas coladas e (b) juntas laminadas.

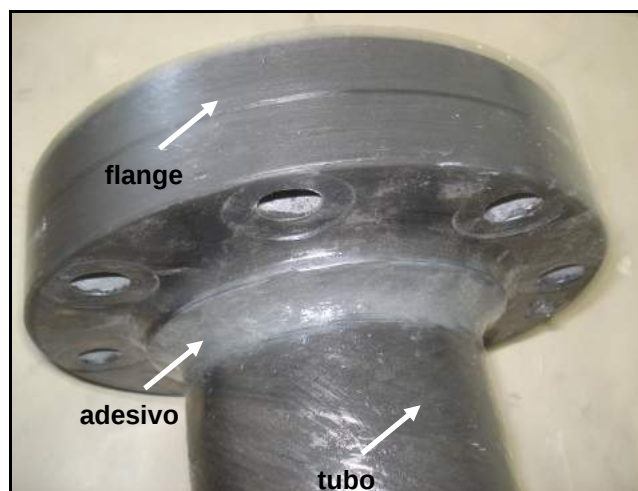


Figura 41 – Detalhe da união flange-tubo das juntas coladas no produto nacional.

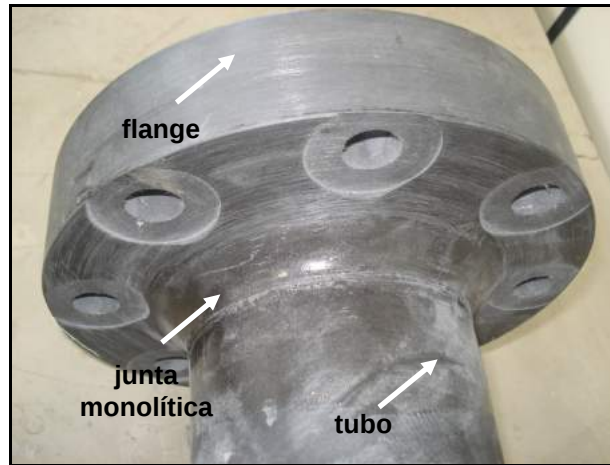


Figura 42 – Detalhe da união flange-tubo das juntas laminadas do produto nacional.



(a)



(b)

Figura 43 – (a) Corpo-de-prova importado com junta colada e (b) detalhe da junta colada luva-tubo.

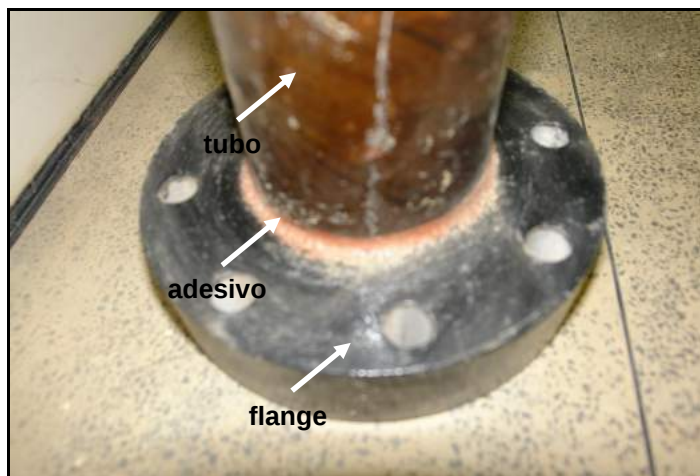


Figura 44 – Detalhe da junta colada flange-tubo do corpo-de-prova importado.

Conforme pode-se visualizar na Figura 45, os dois flanges cegos de vedação dos corpos-de-prova contêm um orifício central de $\frac{1}{2}$ " por onde a água circula no interior do mesmo. Estes dois flanges cegos são fixados utilizando-se anéis de vedação (*o-rings*) de viton de 5" e parafusos ASTM A193 grau b7 rosca UNC 5/8".



Figura 45 – Flanges cegos de aço com orifício central para passagem de água.

Para todos os corpos-de-prova, após os flanges cegos serem parafusados com a colocação dos anéis de vedação (*o-rings*), procede-se a saturação dos corpos-de-prova para eliminar qualquer possibilidade de ar dentro dos mesmos, sendo esta efetuada com a deposição corpo-de-prova em um suporte vertical (Figura 46).

Conforme as Figuras 47 a 49, após a saturação do corpo-de-prova, deposita-se este no suporte horizontal e inicia-se o processo de instalação dos *LVDTs*. Deve-se

ressaltar que a disposição dos *LVDTs* nos corpos-de-prova laminados foi diferente no que tange aos aparelhos localizados na junta intermediária (Figura 50), preferindo-se fixar estes nas direções diametralmente opostas da junta laminada monitorando assim o deslocamento da junta tubo-tubo.



Figura 46 – Corpo-de-prova no suporte de saturação.

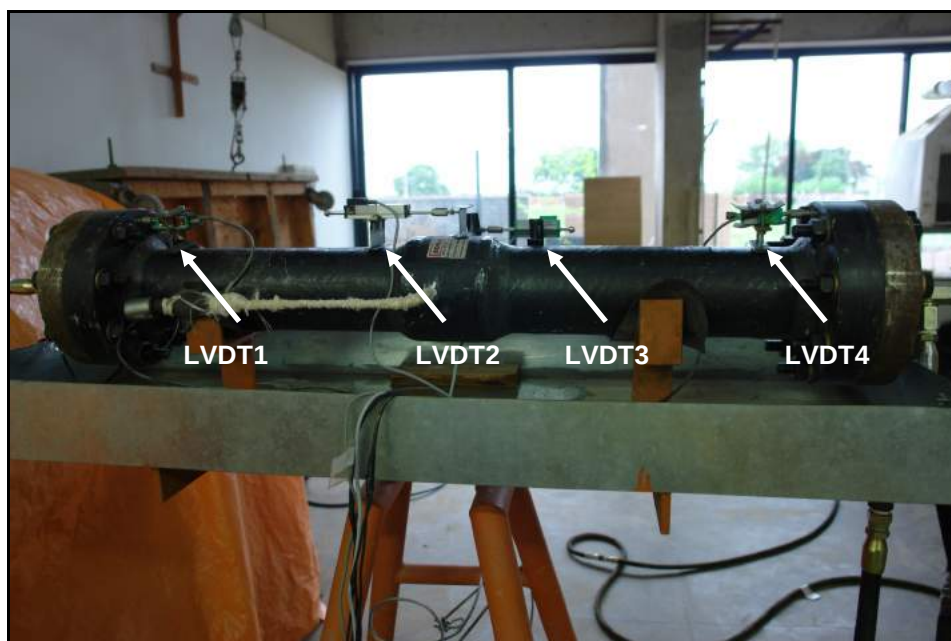


Figura 47 – Fixação dos *LVDTs* no corpo-de-prova.

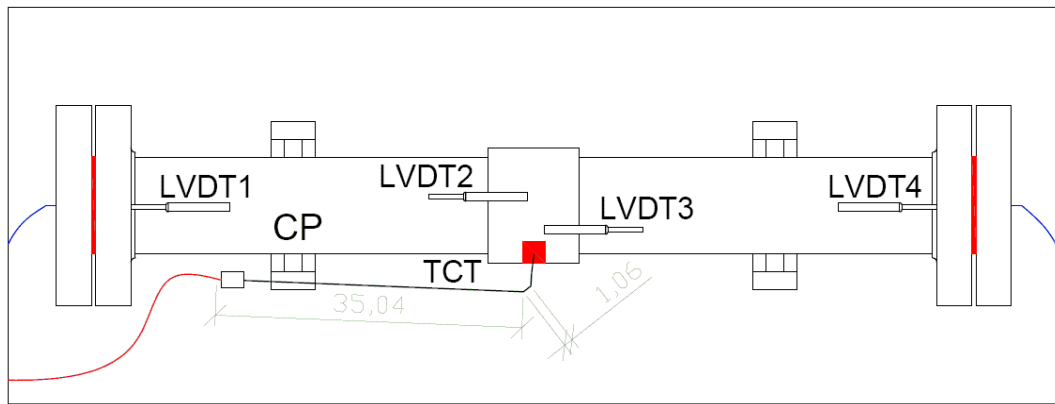


Figura 48 – Disposição dos transdutores de deslocamento (LVDTs) e do transdutor de contato de temperatura (TCT) – vista superior (medidas em cm).

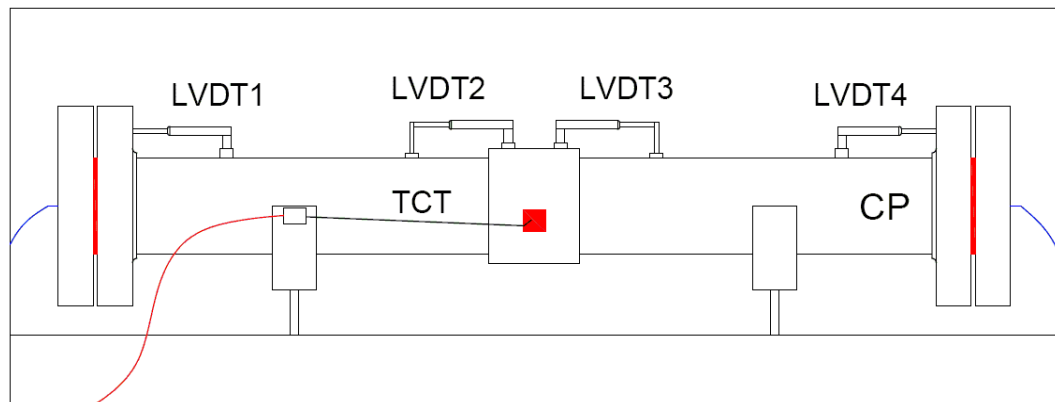


Figura 49 – Disposição dos transdutores de deslocamento (LVDTs) e do transdutor de contato de temperatura (TCT) – vista frontal.

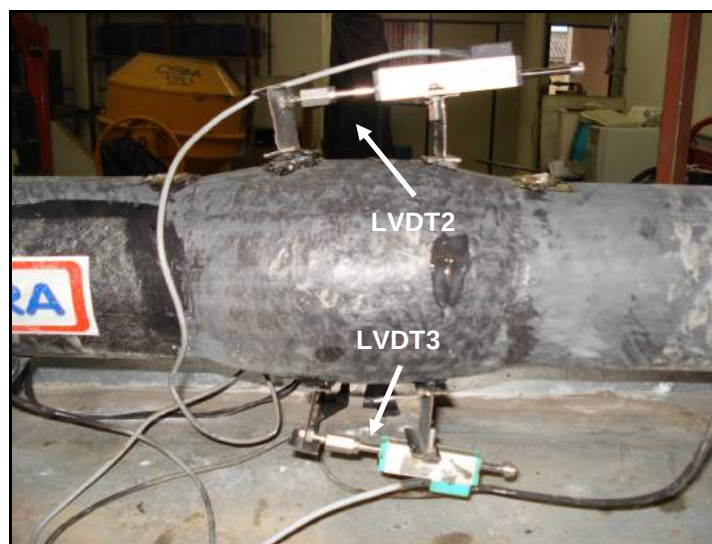


Figura 50 – Disposição dos transdutores intermediários de deslocamento (LVDTs 2 e 3) nos corpos-de-prova laminados.

Quanto ao posicionamento da extremidade dos transdutores de contato de temperatura (TCT e TCTA), foi utilizada pasta térmica para aumentar a área de contato e evitar perda térmica, pois a extremidade do termopar era cilíndrica. Cabe ressaltar ainda que para evitar perdas ao longo da haste do termopar, como pode ser visualizado nas Figuras 51 e 52, este foi isolado utilizando-se manta de fibra de vidro.



Figura 51 – Posicionamento do TCT e detalhe da utilização de pasta térmica.



Figura 52 – Posicionamento do TCTA no corpo-de-prova e detalhe da utilização de pasta térmica.

Após a saturação do corpo-de-prova e do posicionamento dos transdutores tem início a circulação de água quente. Para que o adesivo dos corpos-de-prova sofresse influência da alta temperatura do fluido passante, seria necessário um tempo

desconhecido de circulação de água quente pela bomba centrífuga elétrica (BCE) até que o transdutor de contato de temperatura (TCT) indicasse equilíbrio no monitoramento, visto que para que haja alguma elevação de temperatura da luva é necessário que esta transferência de calor passe pelo tubo e pelo adesivo. Desta forma, quando a temperatura da luva atinge o equilíbrio, pode-se dizer que o mesmo ocorrerá para o adesivo.

Para tanto, foi escolhida a maior temperatura de ensaio (85°C) e foi estimado o tempo de estabilização de temperatura na parede de um setor de tubo de PRFV do fabricante nacional, conforme mostra a Figura 53. Para esta estimativa foram utilizados um ebulidor de alumínio de 127 V, um termômetro digital da marca INSTRUTERM, modelo TH-1300 com sensor tipo K e escala de -50°C a 1300°C e um termômetro de mercúrio com escala de 0 a 250°C.

Inicialmente procurou-se manter a temperatura da água aquecida a 85°C, utilizando-se o ebulidor de alumínio e monitorando-se a temperatura com o termômetro de mercúrio, sendo constantemente monitorada a temperatura da parede externa do setor de tubo através do termômetro digital. A cada 5 minutos eram coletadas a temperatura externa do tubo, a temperatura da água e a temperatura ambiente por meio de um termo-higrômetro da marca FISHER SCIENTIFIC. Estas medidas foram interrompidas quando a temperatura externa do tubo manteve-se estável.



Figura 53 – Estimativa de tempo de estabilização de temperatura na parede de um setor de tubo de PRFV do fabricante nacional.

Outra alternativa utilizada foi a circulação de água quente pela bomba centrífuga elétrica durante um tempo total de ensaio de 6 horas em corpos-de-prova de ambos os fabricantes em intervalos de 5 minutos (Figuras 39 a 44), para a mesma temperatura utilizada na análise anterior, isto é, 85°C. Desta forma foi possível traçar um paralelo das duas abordagens e verificar qual seria o tempo necessário para que o adesivo viesse a sofrer influência da elevação de temperatura do fluido passante nas tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro.

Após a circulação de água quente até que o adesivo sofresse influência da temperatura do fluido o sistema é fechado e inicia-se pressurização dos corpos-de-prova. Conforme a ASTM D 1599 (2005), o ensaio hidrostático deve ser efetuado a uma pressão de 1,5 vezes a pressão de serviço num intervalo de 60 a 70 segundos. Nesta dissertação, para uma mesma temperatura foram consideradas as seguintes etapas de pressurização:

- etapa 1 - pressão aplicada igual a 1,5 vezes a pressão de serviço num intervalo de 60 a 70 segundos (ASTM D 1599, 2005); se a ruptura do corpo-de-prova não ocorrer, dar seqüência à próxima etapa;
- etapa 2 - pressão aplicada igual a 1,5 vezes a pressão de serviço durante 60 minutos; se a ruptura do corpo-de-prova não ocorrer, dar seqüência à próxima etapa;
- etapa 3 - a partir da etapa anterior, acréscimos de 0,5 MPa à pressão anterior, mantidos a cada 70 segundos até a ruptura do corpo-de-prova.

A Tabela 19 apresenta a nomenclatura utilizada para os corpos-de-prova nos ensaios hidrostáticos de cada fabricante.

Tabela 19 – Nomenclatura dos corpos-de-prova.

Temperatura (°C)	Nomenclatura ²²		
	EDRA colado	EDRA laminado	AMERON
Ambiente	CPEaCAMB	CPEaLAMB	CPAaCAMB
85	CPEaC85	CPEaL85	CPAaC85

²² A letra a significa o número do corpo-de-prova, ou seja, 1, 2, 3 e assim por diante.

3. Resultados e discussões

3.1 Caracterização de tubos e adesivos

3.1.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As Figuras 54 a 59 apresentam os espectros obtidos para as amostras do produto nacional (CPEA, CPEB e CPET), onde as abscissas correspondem aos números de onda, isto é, o inverso dos comprimentos de onda, e as ordenadas correspondem à porcentagem de absorção (transmitância) que está, por sua vez, relacionada à rotação/vibração molecular. Salienta-se que na Figura 54 a curva superior é o padrão proveniente de um banco de dados e a inferior refere-se a amostra analisada. Nas Figuras 56 a 58 as duas curvas referem-se a amostra analisada e, na Figura 59 as duas curvas superiores são padrões e as inferiores referem-se a amostra.

Da amostra CPEA, as bandas representam as deformações axiais de Mg-OH (banda 1: 3673 cm^{-1}), de O-H (banda 2: 3502 cm^{-1}), de aromáticos C-H (banda 3: 3059 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 e CH_3 simétricos e assimétricos (banda 4: 2966 cm^{-1} – 2857 cm^{-1}), de C=C (banda 5: 1607 cm^{-1}) e no plano de C=C (banda 6: 1509 cm^{-1}), de C-O (banda 9: 1246 cm^{-1}) e de Si-O (banda 10: 1035 cm^{-1}), além de deformações angulares no plano de CH_2 (banda 7: 1455 cm^{-1}) e de CH_3 (banda 8: 1361 cm^{-1}). De acordo com estes resultados pode-se dizer que a amostra CPEA é composta basicamente de ligações C-H alifáticas e aromáticas, grupamentos hidroxila (O-H) e éster (C-O-C=O), além de carga inorgânica, possivelmente algum silicato. Buscas em banco de dados contendo espectros de diversas substâncias apresentaram sobreposição das bandas de absorção acima de 90% com as bandas de uma resina epóxi-éster tipo bisfenol A.

Espectros de FTIR obtidos por Pires *et al.* (2005) em amostras de resina epóxi tipo bisfenol A (DGEBA) curada com dietilenotriamina (DETA) indicaram as presenças das bandas 2 (3500 cm^{-1} – 3200 cm^{-1}), 3 (3050 cm^{-1} – 2990 cm^{-1}), 4 (3000 cm^{-1} – 2840 cm^{-1}), 7 (1500 cm^{-1} – 1400 cm^{-1}) e 9 (1250 cm^{-1}), reforçando a possibilidade da amostra apresentada no presente trabalho ser um bisfenol A.

Ainda segundo Pires *et al.* (2005) a resina epóxi é caracterizada pelo grupamento epóxi em três bandas características, nas regiões de cerca de 1250 cm^{-1}

correspondente à deformação axial simétrica do anel epóxi (Figura 5), em que todas as ligações do anel expandem-se e contraem-se em fase. Outra banda característica está na faixa 916 cm^{-1} que pode ser atribuída à deformação assimétrica do anel, na qual a ligação C-C se expande ocorrendo contrações das ligações C-O. A terceira banda característica está em 830 cm^{-1} associada à deformação simétrica no plano da ligação C-O-C.

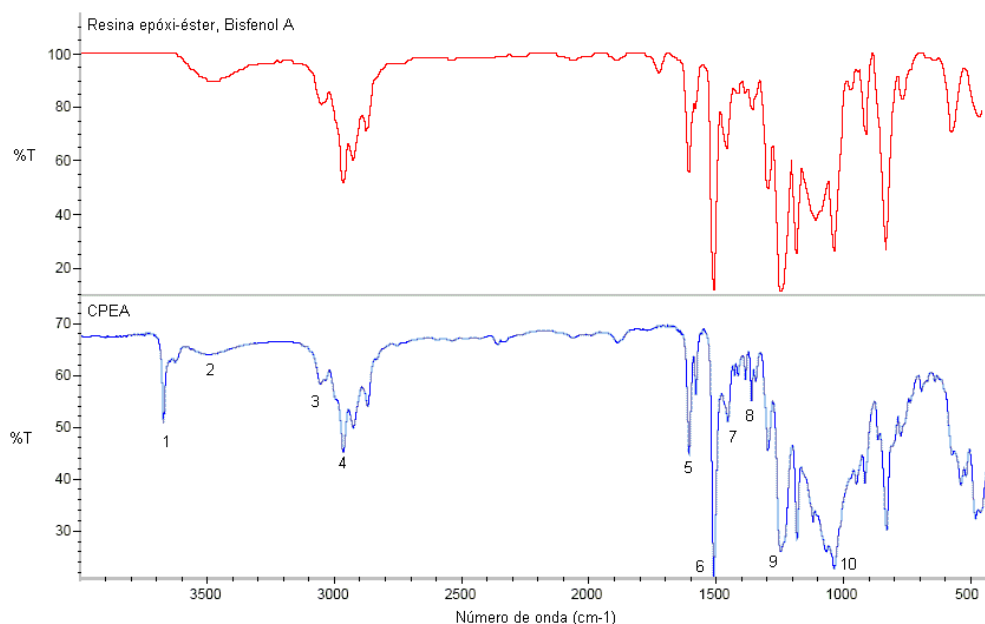


Figura 54 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPEA e um similar de resina bisfenol A.

Da mesma forma que a amostra CPEA, a amostra CPEB (Figura 55) apresenta as bandas referentes à presença de alguma carga inorgânica (banda 1: 3674 cm^{-1} e banda 8: 1067 cm^{-1}), assim como as deformações axiais de alifáticos CH_2 simétricos e assimétricos (banda 3: $2924\text{ cm}^{-1} - 2852\text{ cm}^{-1}$), além de deformações angulares no plano de CH_2 (banda 6: 1455 cm^{-1}) e de CH_3 (banda 7: 1361 cm^{-1}). O diferencial é a presença de deformações axiais de N-H (banda 2: 3280 cm^{-1}) e de N-C=O (banda 4: 1646 cm^{-1}), além de deformação angular simétrica de N-H (banda 5: 1558 cm^{-1}).

De acordo com estes resultados pode-se dizer que a amostra CPEB é composta basicamente de ligações C-H alifáticas, grupamentos amina (N-H) e amida (N-C=O), além de algum tipo de carga inorgânica. Buscas em diferentes bancos de dados apresentaram sobreposição inferior a 50% com espectros de diversas substâncias.

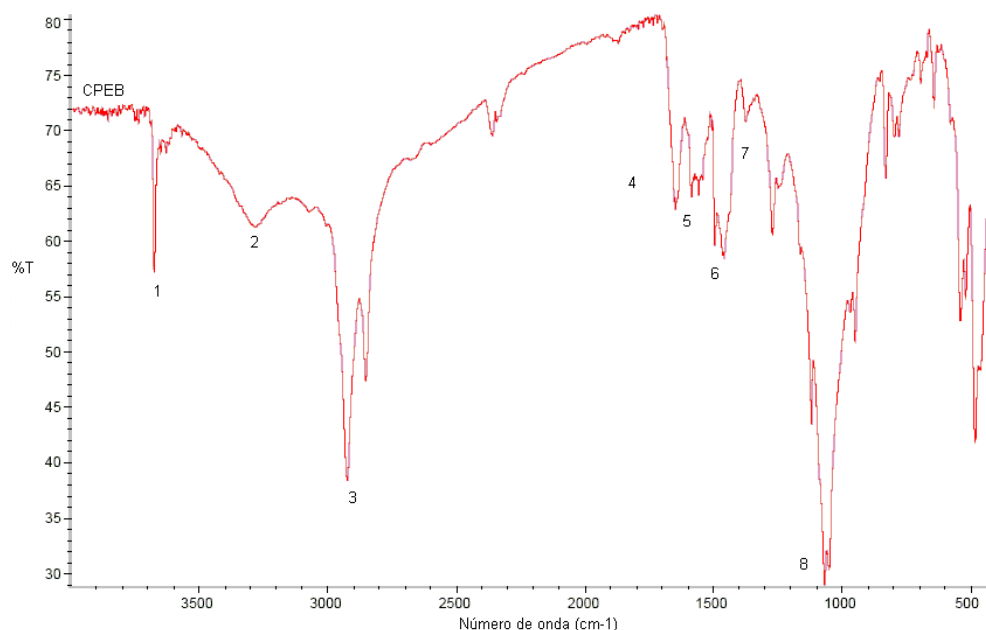


Figura 55 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPEB.

Os espectros das amostras CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B (Figuras 56 a 58) apresentaram a sobreposição das bandas de absorção das amostras CPEA e CPEB, com diferenças apenas nas intensidades destas, isto é, foram visualizadas bandas referentes a deformações axiais de cargas inorgânicas Mg-OH (banda 1: 3671 cm^{-1}) e Si-O (banda 9: 1067 cm^{-1}), de O-H (banda 2: 3399 cm^{-1}), de aromáticos C-H (banda 3: 3059 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 simétricos e assimétricos (banda 4: $2925\text{ cm}^{-1} - 2852\text{ cm}^{-1}$), de N-C=O (banda 5: 1643 cm^{-1}), de C-O (banda 8: 1248 cm^{-1}), além de deformação angular no plano de CH_2 (banda 6: 1461 cm^{-1}) e de CH_3 (banda 7: 1362 cm^{-1}).

Nas amostras do produto de pirólise está ausente o pico referente às cargas inorgânicas (banda 1: 3674 cm^{-1} e banda 9: 1067 cm^{-1}). Sendo assim, o adesivo é constituído por ligações C-H alifáticas e aromáticas, grupamentos hidroxila, amida e, possivelmente, éter, além de alguma carga inorgânica.

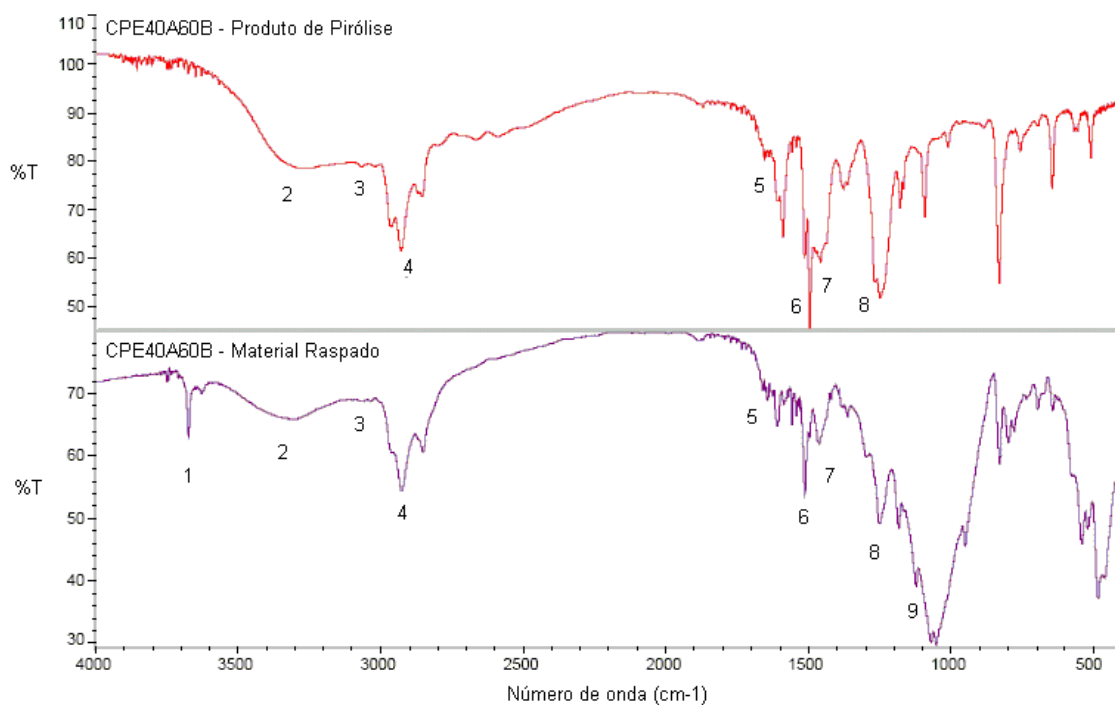


Figura 56 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE40A60B (material raspado e produto de pirólise).

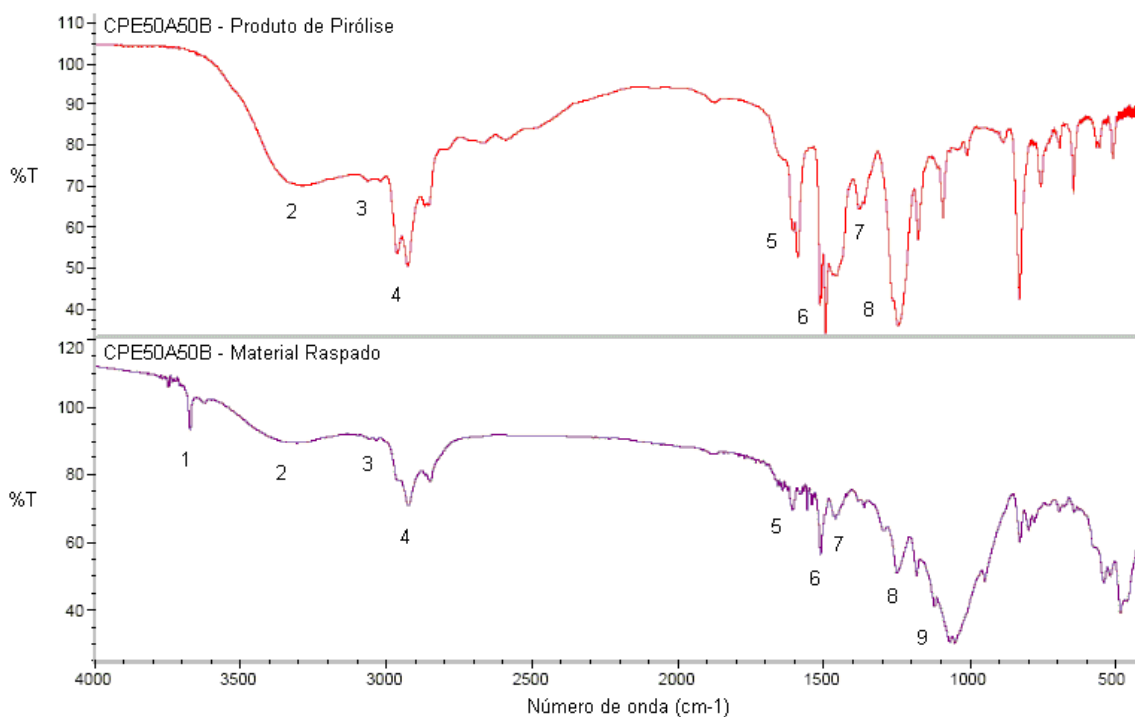


Figura 57 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE50A50B (material raspado e produto de pirólise).

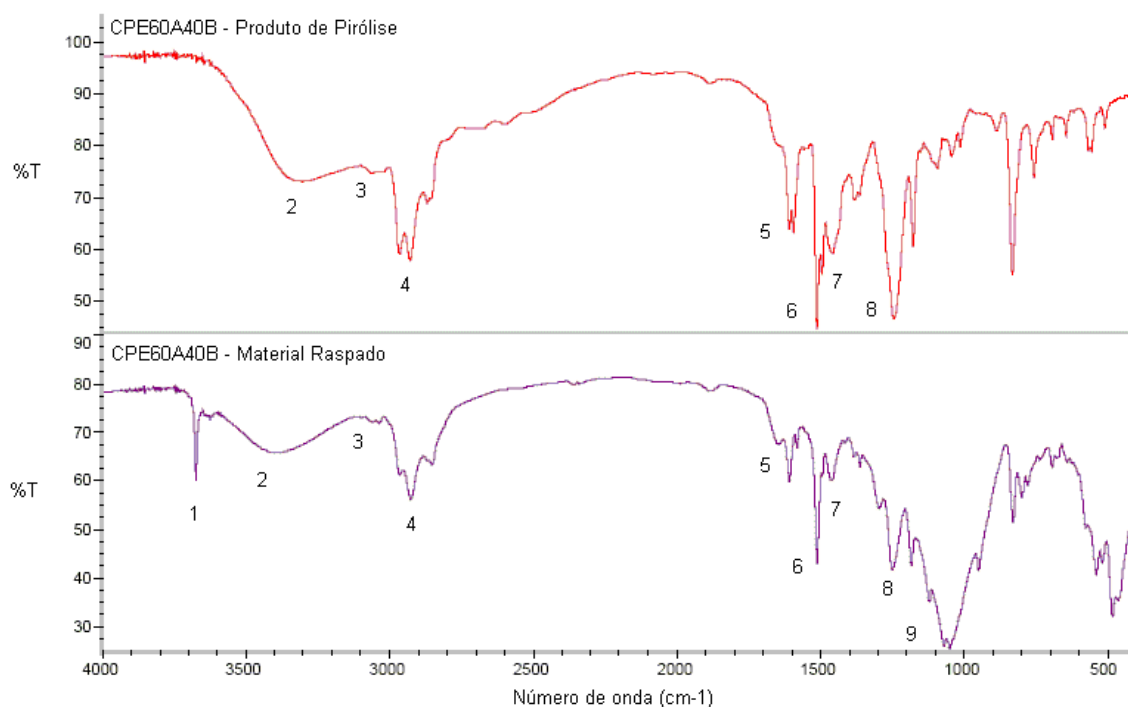


Figura 58 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPE60A40B (material raspado e produto de pirólise).

Assim como a amostra CPEA (Figura 54), a amostra CPET (Figura 59) apresenta algumas similaridades como deformações axiais de O-H (banda 1: 3331 cm^{-1}), de aromáticos C-H (banda 2: 3025 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 e CH_3 simétricos e assimétricos (banda 3: 2966 cm^{-1} – 2857 cm^{-1}), de C=C (banda 6: 1602 cm^{-1}) e no plano de C=C (banda 7: 1508 cm^{-1}), de C-O (banda 10: 1236 cm^{-1}) e de Si-O (banda 11: 1015 cm^{-1}), além de deformações angulares no plano de CH_2 (banda 8: 1472 cm^{-1}) e de CH_3 (banda 9: 1382 cm^{-1}).

A amostra CPET apresenta algumas similaridades com a amostra CPEB (Figura 55) como a deformação axial de N-C=O (banda 5: 1652 cm^{-1}). O diferencial foi a presença de deformação axial de C=O (banda 4: 1726 cm^{-1}). Da Figura 59 deve-se ressaltar que na amostra do produto de pirólise está ausente a banda referente à carga inorgânica.

Em suma, a amostra CPET é composta de ligações C-H alifáticas e aromáticas, grupamentos hidroxila (O-H), éster (C-O-C=O) e amida (N-C=O), além de carga inorgânica, possivelmente silicato na forma de fibras de vidro e/ou algum material de enchimento. Buscas em banco de dados contendo espectros de diversas substâncias apresentaram sobreposição das bandas de absorção em torno de 63% com as bandas

de uma resina epóxi curada com amido-amina ou curada com amino-éter. Cabe ressaltar que segundo o fabricante esta amostra seria um epóxi vinil éster.

Lançando mão dos espectros de *FTIR* obtidos por de Pires *et al.* (2005) em amostras de resina epóxi tipo bisfenol A (*DGEBA*) curada com dietilenotriamina (*DETA*) foi verificada a presença das bandas 1 ($3500\text{ cm}^{-1} - 3200\text{ cm}^{-1}$), 2 ($3100\text{ cm}^{-1} - 3000\text{ cm}^{-1}$), 3 ($3000\text{ cm}^{-1} - 2840\text{ cm}^{-1}$), 8 ($1500\text{ cm}^{-1} - 1400\text{ cm}^{-1}$), 10 (1250 cm^{-1}), possivelmente a diferença entre a amostra CPET e amostra destes autores estaria no tipo de catalisador.

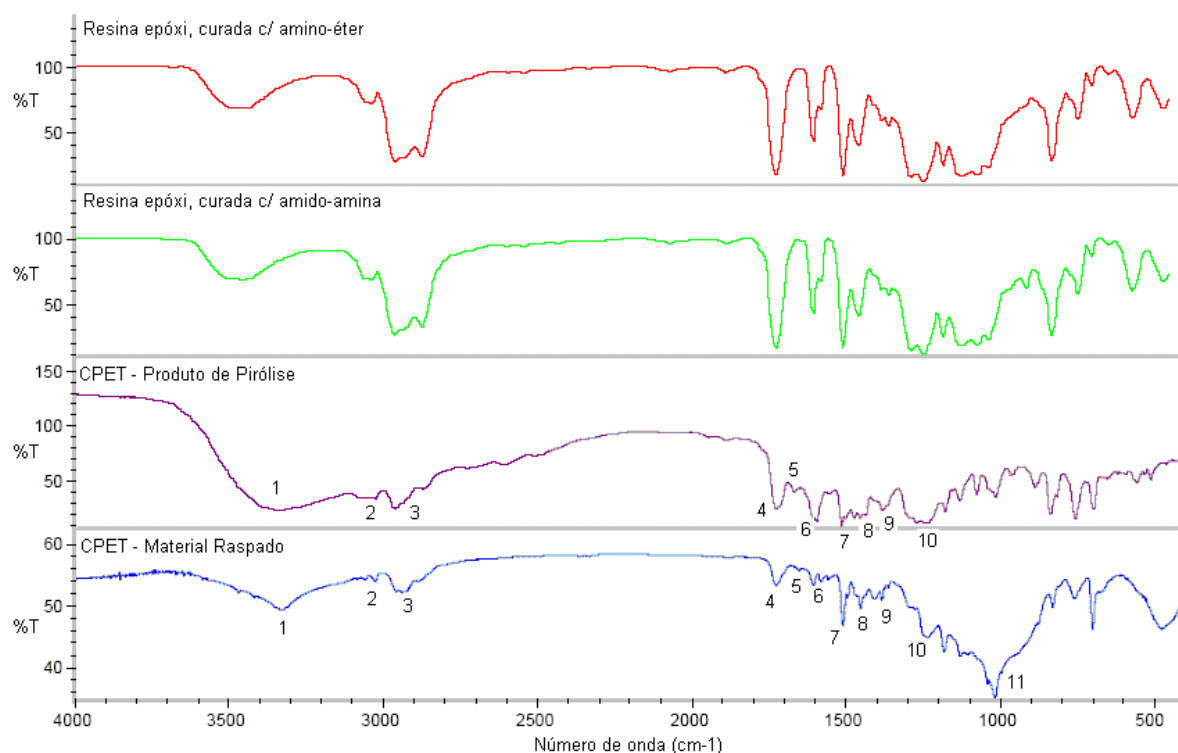


Figura 59 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPET (material raspado e produto de pirólise) e substâncias similares de banco de dados.

As Figuras 60 a 65 apresentam os espectros obtidos para as amostras do produto importado (CPAA, CPAB e CPAT), onde, da mesma forma que no produto nacional, as abscissas correspondem aos números de onda e as ordenadas correspondem à porcentagem de absorção. Salienta-se que nas Figuras 60 e 61 a curva superior é o padrão proveniente de um banco de dados e a inferior refere-se a amostra analisada. Nas Figuras 62 a 64 as duas curvas referem-se a amostra analisada

e, na Figura 65 as duas curvas superiores são padrões e as inferiores referem-se a amostra.

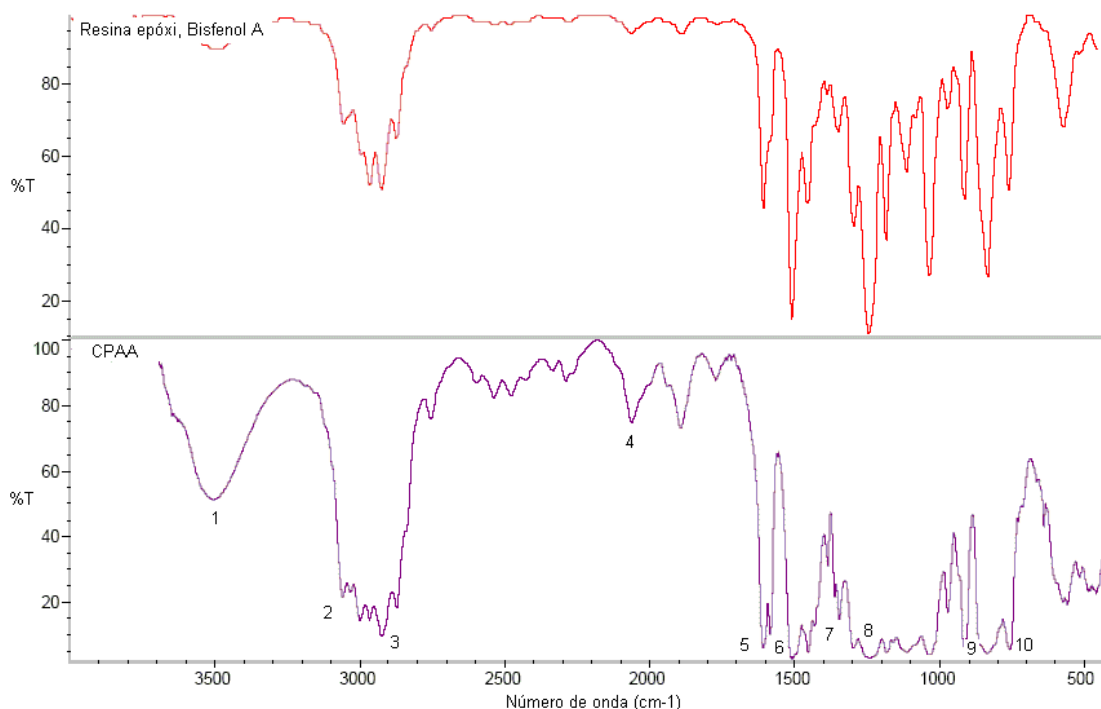


Figura 60 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAA e um similar de resina bisfenol A.

Da amostra CPAA (Figura 60), as bandas representam deformações axiais de O-H (banda 1: 3508 cm^{-1}), de aromáticos C-H (banda 2: 3058 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 e CH_3 simétricos e assimétricos (banda 3: $2966\text{ cm}^{-1} - 2838\text{ cm}^{-1}$), de C=C (banda 5: 1608 cm^{-1}) e de C-O (banda 8: 1240 cm^{-1}), além de harmônicas ou bandas de combinação de aromáticos (banda 4: $2289\text{ cm}^{-1} - 1772\text{ cm}^{-1}$), deformação angular no plano de CH_2 sobreposta à deformação axial no plano de C=C (banda 6: 1453 cm^{-1}), deformação angular no plano de CH_3 (banda 7: 1345 cm^{-1}) e deformação angular fora do plano de C-H (banda 9 : 831 cm^{-1} e banda 10: 756 cm^{-1}).

Diferentemente da resina nacional (Figura 54), na resina importada (componente A) não se verificou a presença de carga inorgânica nos espectros de *FTIR*. Desta forma, pode-se dizer que a amostra CPAA é composta por ligações C-H alifáticas e aromáticas e por grupos hidroxila (O-H). Buscas em banco de dados com espectros de distintas substâncias apresentaram sobreposição das bandas de absorção superior a

79% com as bandas de uma resina epóxi tipo bisfenol A, semelhantemente ao produto nacional, todavia, com diferenças em algumas bandas.

Dos espectros de *FTIR* obtidos por Pires *et al.* (2005) foi verificada a presença das bandas 1 ($3500\text{ cm}^{-1} - 3200\text{ cm}^{-1}$), 2 ($3100\text{ cm}^{-1} - 3000\text{ cm}^{-1}$), 3 ($3000\text{ cm}^{-1} - 2840\text{ cm}^{-1}$) e 8 (1250 cm^{-1}), reforçando a possibilidade da amostra apresentada no presente trabalho de ser um bisfenol A.

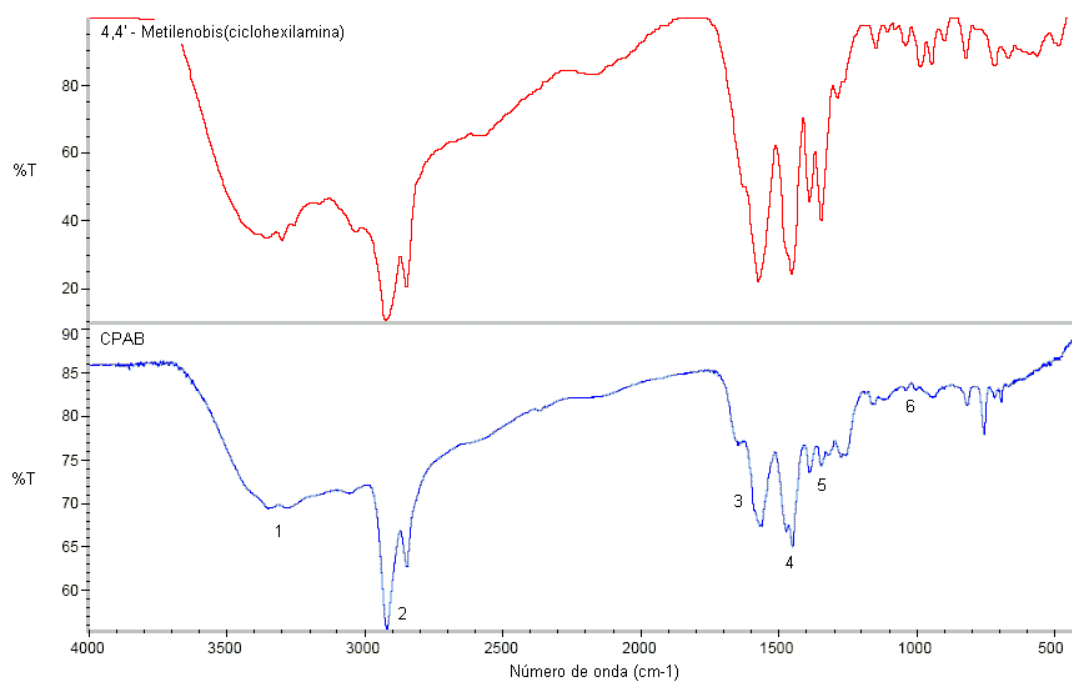


Figura 61 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAB e um similar ciclohexilamina.

Semelhantemente à amostra CPAA (Figura 60), a amostra CPAB apresenta as bandas referentes à deformação axial de O-H (banda 1: $3349\text{ cm}^{-1} - 3283\text{ cm}^{-1}$); contudo, a amostra CPAB apresenta sobreposição desta com deformação axial de N-H. Outras similaridades são deformações axiais de alifáticos CH_2 (banda 2: $2920\text{ cm}^{-1} - 2848\text{ cm}^{-1}$) e de C-O (banda 5: 1274 cm^{-1}), além de deformação angular no plano de CH_2 (banda 4: 1449 cm^{-1}). O diferencial da amostra apresentada na Figura 61 é a presença de deformação angular simétrica no plano de N-H (banda 3: 1647 cm^{-1}) e deformação axial de C-N (banda 6: 1037 cm^{-1}).

Diferentemente do catalisador nacional (Figura 55), o importado não apresentou o grupamento amida (N-C=O). Dos resultados apresentados, a amostra CPAB é

composta basicamente de ligações C-H alifáticas, por grupamentos amina (N-H) e provável presença de hidroxila (O-H), uma vez que a banda característica da mobilidade deste grupamento está sobreposta à deformação axial de N-H.

Utilizando-se banco de dados de compostos conhecidos ficou evidente uma sobreposição superior a 85% entre as bandas de absorção da amostra analisada e de uma amina cíclica tipo 4,4'-metilenobis(ciclohexilamina), conforme mostrado na Figura 61. Mais uma vez a partir dos resultados de Pires *et al.* (2005) foi verificada a presença somente das bandas 2 ($1650\text{ cm}^{-1} - 1580\text{ cm}^{-1}$) e 3 ($3000\text{ cm}^{-1} - 2840\text{ cm}^{-1}$).

Os espectros das amostras CPA40A60B, CPA50A50B e CPA60A40B (Figuras 62 a 64) apresentaram a sobreposição das bandas de absorção das amostras CPAA e CPAB, com diferenças apenas nas intensidades destas, isto é, foram visualizadas bandas referentes a deformações axiais O-H (banda 1: $3430\text{ cm}^{-1} - 3291\text{ cm}^{-1}$), de aromáticos C-H (banda 2: 3019 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 e CH_3 simétricos e assimétricos (banda 3: $2966\text{ cm}^{-1} - 2838\text{ cm}^{-1}$), de C=C (banda 4: 1608 cm^{-1}), de C-O (banda 6: 1240 cm^{-1}) e deformação angular no plano de CH_2 sobreposta à deformação axial no plano de C=C (banda 5: 1453 cm^{-1}). Diferentemente do adesivo nacional, os resultados de *FTIR* do importado não indicaram a presença de compostos inorgânicos.

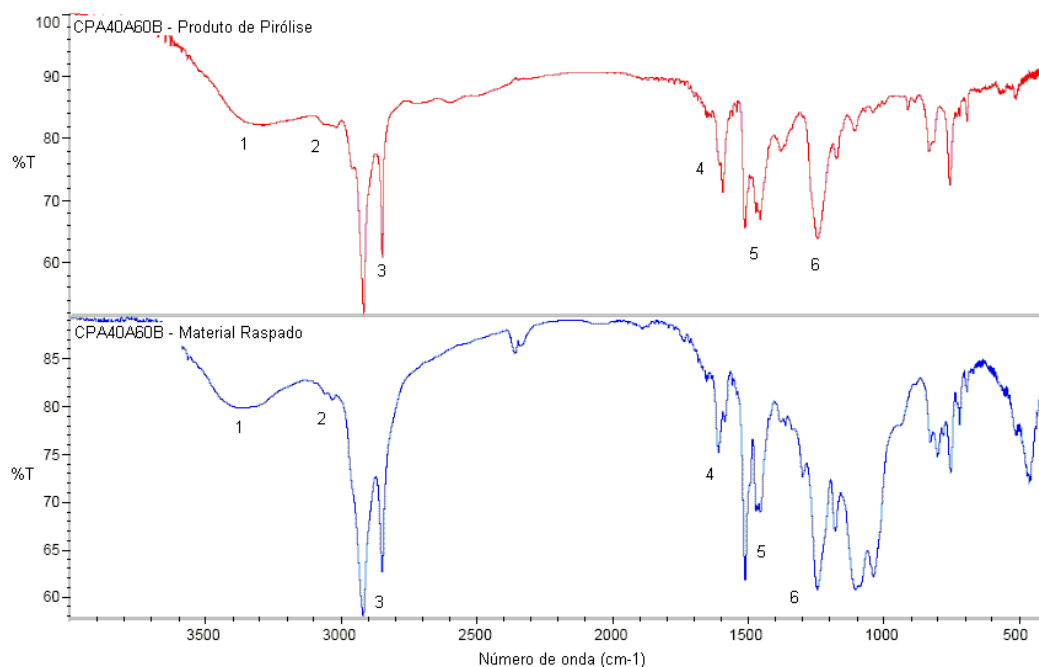


Figura 62 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA40A60B (material raspado e produto de pirólise).

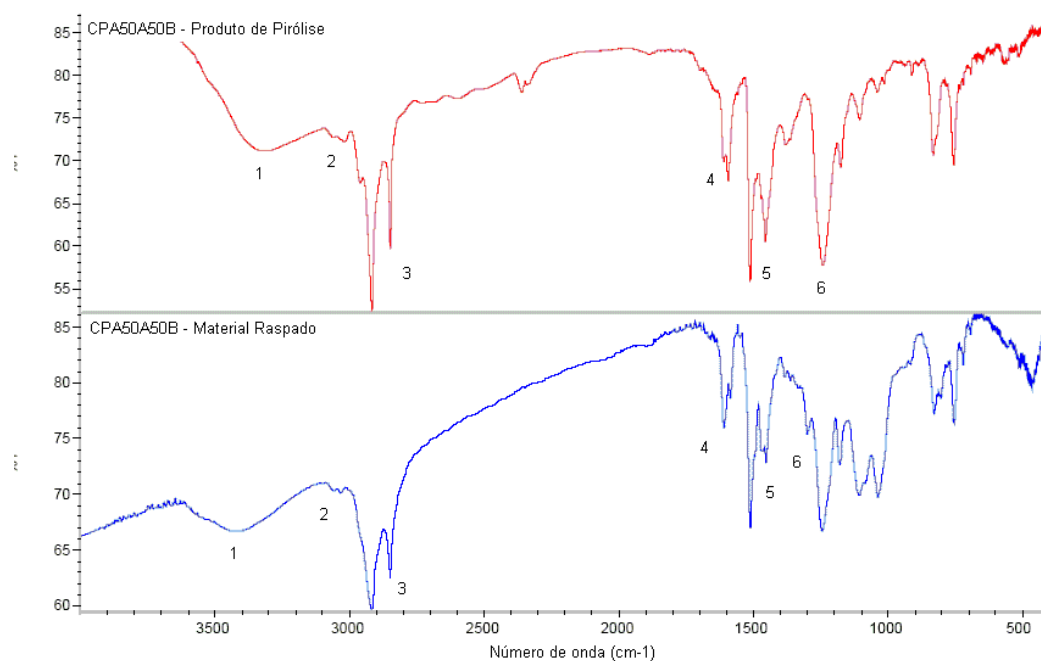


Figura 63 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA50A50B (material raspado e produto de pirólise).

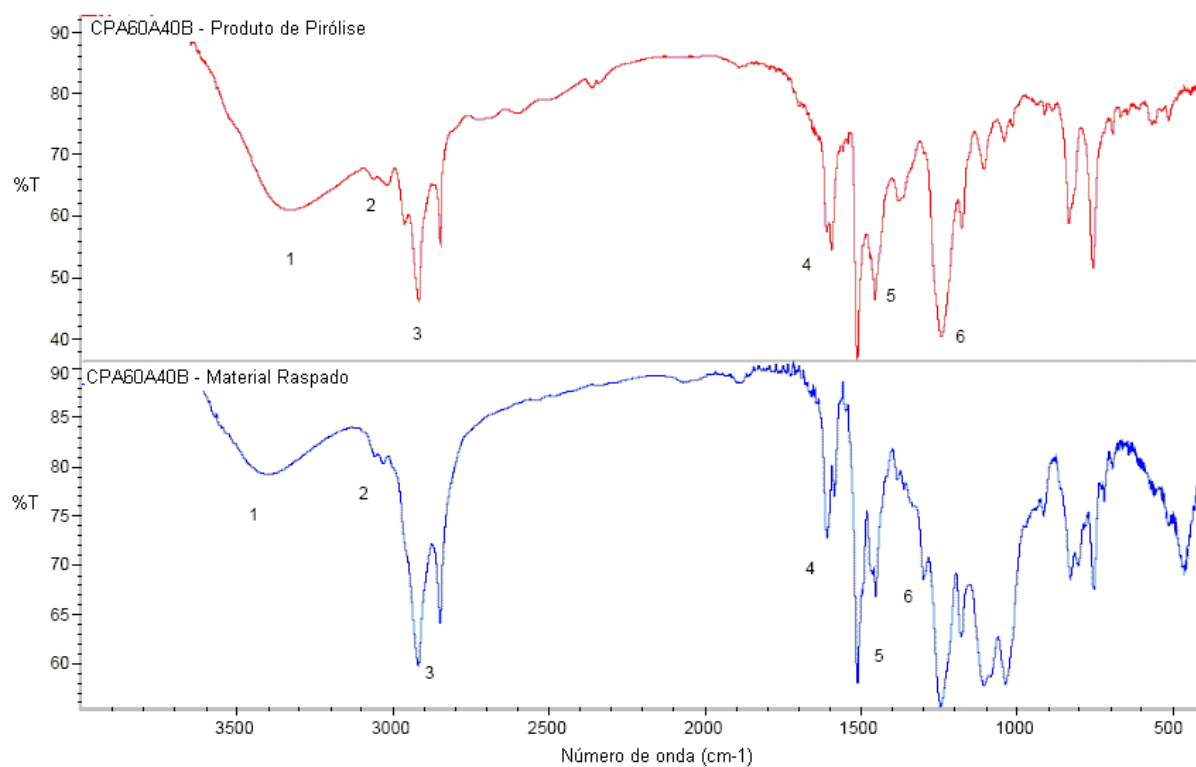


Figura 64 – Espectro no infravermelho obtido da amostra CPA60A40B (material raspado e produto de pirólise).

Da mesma forma que a amostra CPAA (Figura 60), a amostra CPAT (Figura 65) apresenta algumas similaridades, como deformações axiais de O-H (banda 1: 3372 cm^{-1}), de aromáticos C-H (banda 2: 3022 cm^{-1}), de alifáticos CH_2 e CH_3 simétricos e assimétricos (banda 3: 2963 cm^{-1} – 2838 cm^{-1}), de C=C (banda 4: 1610 cm^{-1}) e de C-O (banda 6: 1297 cm^{-1}), além de deformação angular no plano de CH_2 (banda 5: 1457 cm^{-1}).

A similaridade da amostra CPAT (Figura 65) com a amostra CPAB (Figura 61) está em relação aos compostos referentes às bandas 1, 3, 5 e 6. O grande diferencial da amostra do tubo em relação aos componentes do adesivo (Figuras 60 e 61) é a presença de deformação axial de Si-O (banda 7: 1035 cm^{-1}), provavelmente devido à presença de silicato na forma de fibras de vidro e/ou carga mineral, conforme observado por Sánchez-Soto *et al.* (2007). No produto de pirólise, a banda referente a carga inorgânica não foi observada.

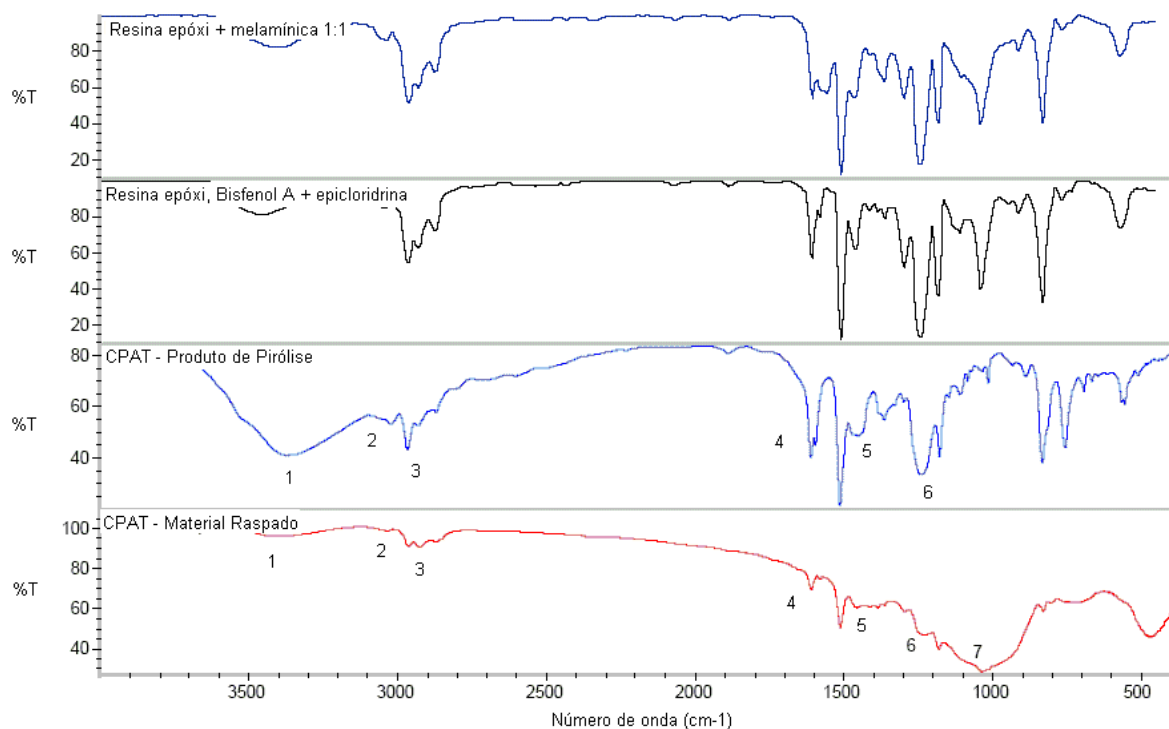


Figura 65 – Espectros no infravermelho obtidos da amostra CPAT (material raspado e produto de pirólise) e substâncias similares de banco de dados.

Diferentemente da amostra do tubo nacional (Figura 59), a amostra do tubo importado (Figura 65) não apresentou a estrutura do composto amida (N-C=O).

Efetuada-se buscas em bancos de dados contendo espectros de diversas substâncias foi verificada sobreposição regular em torno de 69% das bandas de absorção da amostra CPAT com resina epóxi tipo bisfenol A curada com epicloridrina ou de resina epóxi curada com melamínica na relação 1:1.

As semelhanças entre os espectros obtidos por Pires *et al.* (2005) e da amostra CPAT foram referentes as bandas 1 ($3500\text{ cm}^{-1} - 3200\text{ cm}^{-1}$), 2 ($3100\text{ cm}^{-1} - 3000\text{ cm}^{-1}$), 3 ($3000\text{ cm}^{-1} - 2840\text{ cm}^{-1}$) e 5 ($1500\text{ cm}^{-1} - 1400\text{ cm}^{-1}$) indicando a grande possibilidade da resina do material ser um bisfenol A com indefinição apenas do catalisador.

3.1.2 Análise termogravimétrica (TGA)

As Figuras 66 a 68 apresentam as curvas termogravimétricas das amostras CPEA, CPEB, CPET, além das misturas das duas primeiras, todas estas relacionadas ao produto nacional.

A Figura 66a apresenta o comportamento da amostra CPEA frente à variação de temperatura, onde pode-se notar que a temperatura *onset*, isto é, a temperatura onde o material inicia perda de massa foi por volta de 180°C . Entre 180°C e 305°C foi observada uma 1.^a perda (18,43%) associada a um único evento térmico, como pode ser visualizada na respectiva curva *DTG*, sendo a taxa máxima de variação em 250°C . Entre 305°C e 480°C ocorreu uma 2.^a perda (37,39%) em um único evento térmico, apresentando uma taxa máxima de variação de massa em 400°C . Entre 480°C e 900°C não foi observada nenhuma variação significativa de massa, apresentando ao final um teor de resíduos inorgânicos de 44,18%, em acordo com os resultados de *FTIR* (Figura 54).

Na Figura 66b observa-se o desempenho da amostra CPEB com a variação de temperatura, onde a temperatura de *onset* para a 1.^a perda (20,36%) foi de 75°C até 275°C , em um único evento térmico, com máxima taxa de variação em 150°C . Cabe lembrar que a temperatura de serviço deste adesivo quando aplicado em plataformas marítimas seria de 85°C com transientes de até 115°C , assim quando o adesivo está sendo utilizado nas juntas coladas, na temperatura de serviço o catalisador já estaria iniciando a sua degradação. Em seguida, foi verificada uma 2.^a perda (33,01%) até

465°C em um único evento térmico, com taxa máxima em 410°C. Em seguida, tem-se um patamar até o final da análise, sendo o teor de resíduos de 46,63%, possivelmente algum tipo de silicato como carga mineral, como já mostrado nos espectros de *FTIR* (Figura 55).

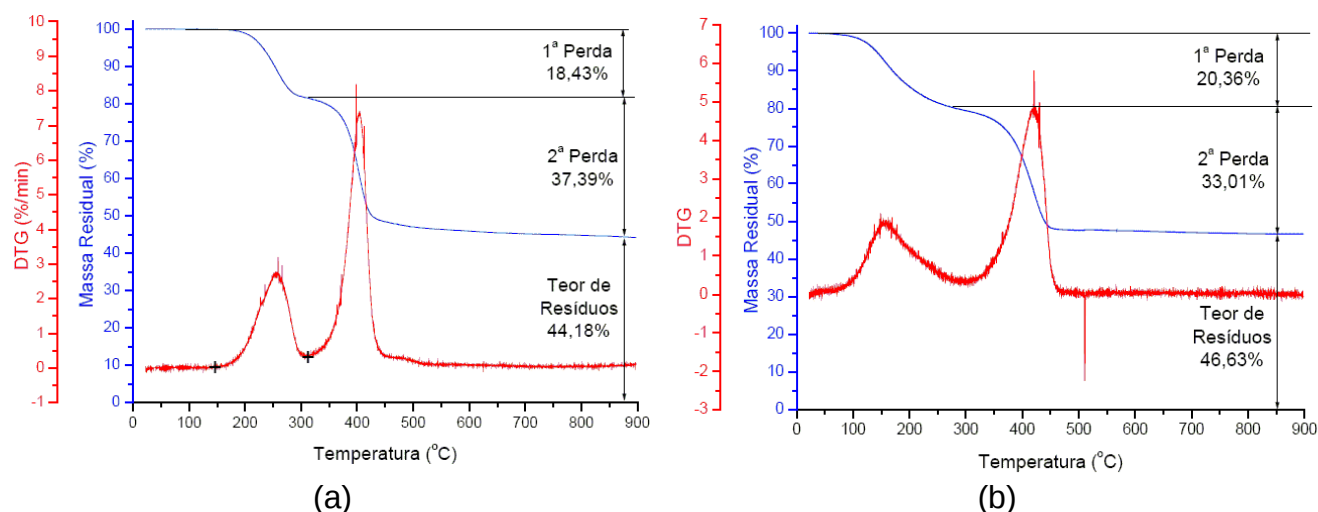


Figura 66 – Curvas *TGA* e *DTG* das amostras: (a) CPEA; (b) CPEB.

As Figuras 67a, 67b e 68a representam, respectivamente, as amostras CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B, que possuem, por sua vez, diferenças estequiométricas entre si. Estas amostras apresentaram uma perda de massa entre 49,86% e 54,44%, com início por volta de 210°C e término por volta de 450°C em dois eventos térmicos sobrepostos (entre 350°C e 450°C). O grande diferencial refere-se à amostra CPE50A50B (Figura 68a) que apresentou uma 1.^a perda de massa (3,94%) entre 110°C e 215°C, salientando que se na aplicação do adesivo em plataformas marítimas houver o transiente térmico máximo, o mesmo já estaria se degradando. Pode-se dizer que as amostras dos adesivos CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B apresentaram uma sobreposição das curvas *TGA* das amostras CPEA (Figura 66a) e CPEB (Figura 66b).

A Figura 68b apresenta o comportamento da amostra CPET, onde nota-se que a temperatura *onset* da 1.^a perda (3,48%) ocorreu por volta de 105°C, com um máximo em 205°C. Percebe-se que da mesma forma que o adesivo CPE50A50B, a amostra de tubo CPET, apresenta degradação na faixa de temperatura de serviço da indústria do petróleo. Entre 280°C e 295°C foi observado um pequeno patamar e, em seguida, entre

as temperaturas de 295°C e 460°C foi observada uma 2.^a perda (58,94%) associada a um único evento térmico, com uma taxa máxima de variação em 400°C. A partir de 480°C é mantido um patamar sem variação de massa, com teor de resíduos inorgânicos de 37,58%, relacionado às fibras de vidro e/ou carga mineral remanescentes, em concordância com as bandas correspondentes a inorgânicos nos espectros de *FTIR* (Figura 59).

Dos resultados obtidos, nota-se que a mistura de adesivo preconizada pelo fabricante é aquela que mais se aproxima do tubo, assim, no que tange a degradação térmica ambos perdem a mesma porcentagem de massa com a elevação de temperatura.

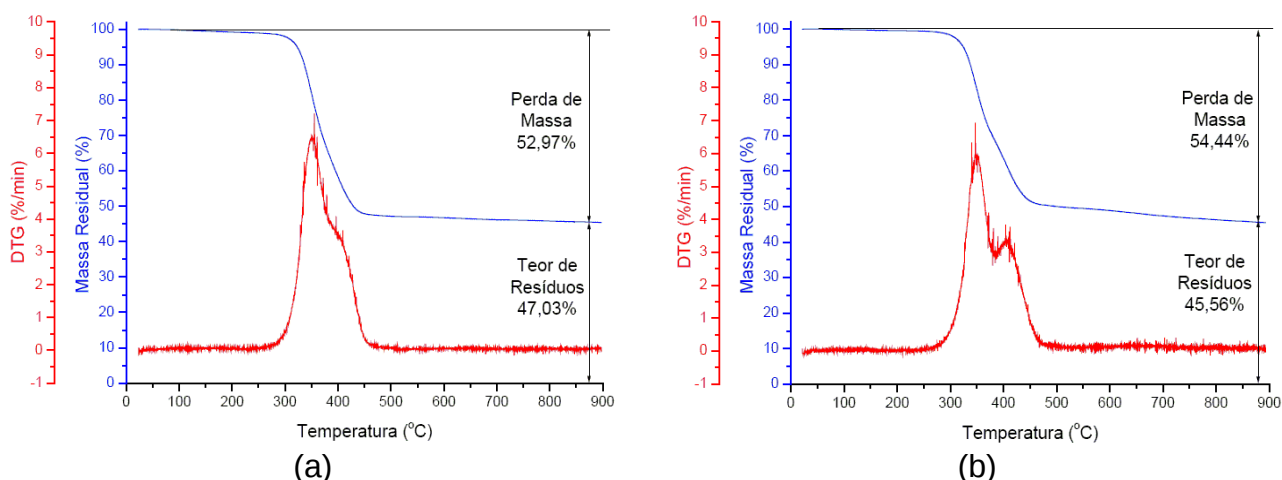


Figura 67 – Curvas *TGA* e *DTG* das amostras: (a) CPE40A60B; (b) CPE60A40B.

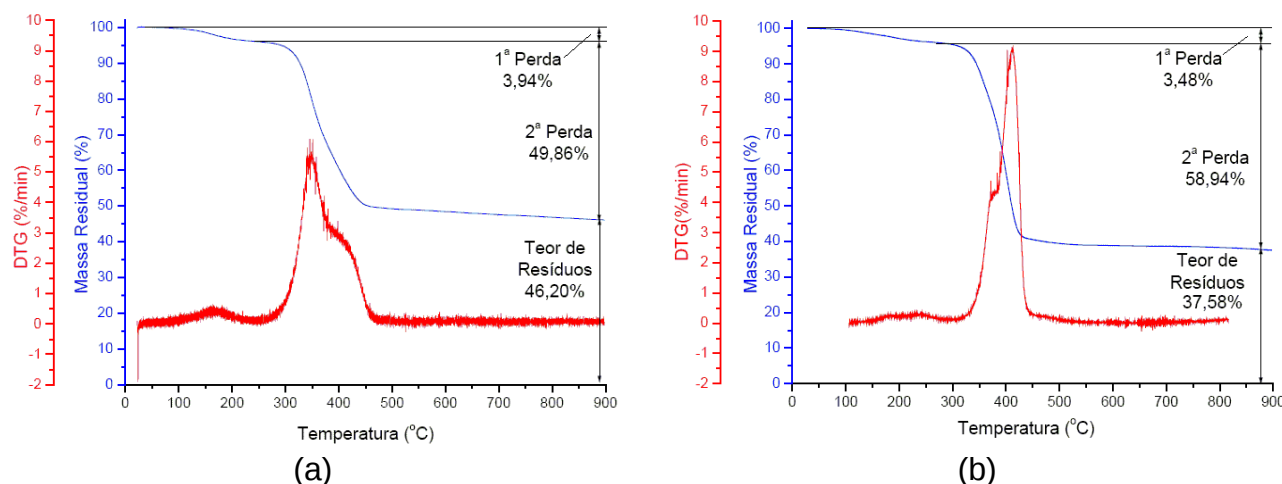


Figura 68 – Curvas *TGA* e *DTG* das amostras: (a) CPE50A50B; (b) CPET.

As Figuras 69 a 71 apresentam os resultados térmicos das amostras CPAA, CPAB, CPAT, além das misturas dos componentes do adesivo nas proporções indicadas anteriormente.

O comportamento da amostra CPAA pode ser verificado na Figura 69a, onde percebe-se que até 215°C o componente A do adesivo não apresentou nenhuma variação significativa de massa. Entre 215°C e 510°C a amostra apresentou uma 1.^a perda (68,28%) subdividida em dois eventos térmicos, como pode ser verificado na curva *DTG*. As temperaturas de decomposição, associadas aos eventos térmicos supracitados, foram 341°C e 397°C. Entre 510°C e 550°C nota-se um pequeno patamar com uma perda lenta de massa (7,61%) a partir de 550°C até o fim da análise, sendo o teor de resíduos de 24,11%, aproximadamente metade da amostra da resina nacional (amostra CPEA, Figura 66a). Isto, provavelmente, foi devido ao tipo de carga inorgânica presente no material, embora não verificado nos resultados de *FTIR* (Figura 60).

Com relação ao comportamento do catalisador (CPAB), da Figura 69b percebe-se que a amostra perde massa praticamente desde o início da análise, onde até 335°C ocorre uma 1.^a perda (41,03%) em um único evento térmico, cuja temperatura de decomposição é de 210°C. Da mesma forma que o catalisador nacional, o importado inicia degradação na temperatura de serviço das tubulações de PRFV.

Após a 1.^a perda, entre 335°C e 400°C ocorre um pequeno patamar; todavia, a partir de 400°C até 530°C ocorre uma perda significativa de massa da amostra (57,84%). Ao final obteve-se uma massa residual de 1,13%, notadamente inferior ao catalisador nacional (amostra CPEB, Figura 66b). Desta forma pode-se dizer que o componente B do adesivo possui baixa quantidade de carga inorgânica, não identificável nas análises de *FTIR* (Figura 61).

Ao estudarem a diferença de estabilidade térmica entre um bisfenol A sem e com catalisador a base de amina, Delor-Jestin *et al.* (2006) verificaram que o último permite uma certa estabilidade a 400°C enquanto o primeiro perdia quase 90% de sua massa inicial a 200°C. Os autores verificaram também que o teor de resíduo para todas as amostras variou entre 1% e 3%, bem próximo ao encontrado no presente trabalho para o catalisador importado.

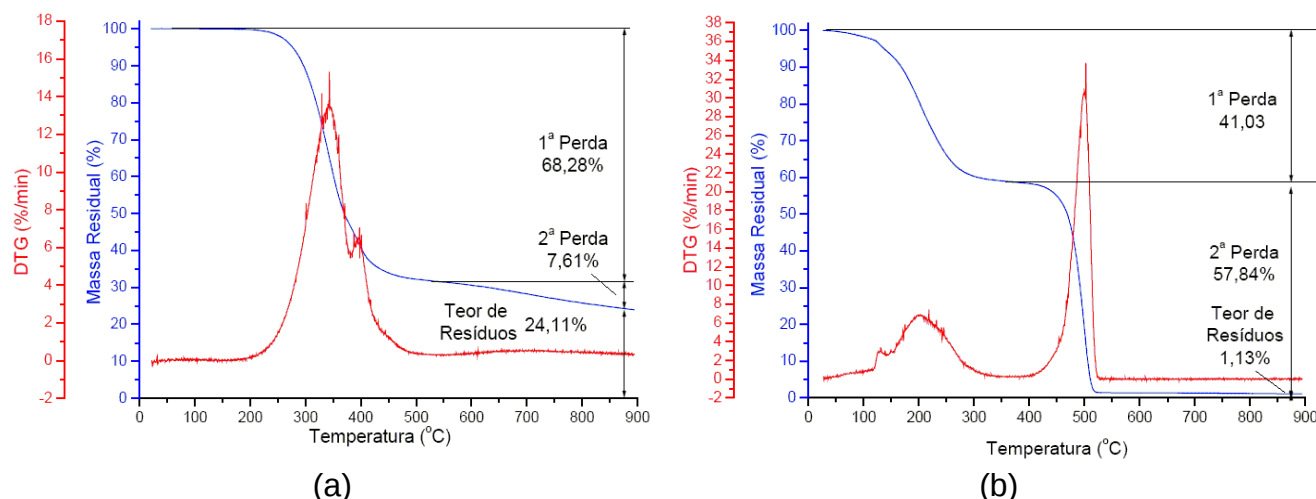


Figura 69 – Curvas TGA e DTG das amostras: (a) CPAA; (b) CPAB.

Com relação às misturas adesivas (CPA40A60B, CPA50A50B e CPA60A40B), as Figuras 70a, 70b e 71a apresentam as curvas termogravimétricas obtidas. Percebe-se que, assim como nas amostras nacionais, as diferenças estequiométricas das misturas do produto importado não foram suficientes para influenciar qualitativamente os resultados, pois estas não apresentaram perda significativa de massa entre 145°C e 165°C. Entre 150°C e 527°C as amostras apresentaram uma perda de massa média de 78,66% em dois eventos térmicos, onde o primeiro está associado ao componente A (Figura 69a) e o segundo ao componente B (Figura 69b) do adesivo. A partir de 530°C as amostras apresentaram um patamar até o final da análise, exceto a amostra CPA50A50B, que apresentou uma perda adicional e lenta de 6,40%. Ao final das análises as amostras apresentaram massa residual média de 19,21%, sendo, portanto, metade daquele obtido para o similar nacional (Figuras 67a, 68b e 68a). Destes resultados pode-se dizer que uma maior quantidade de componente A apresenta uma maior estabilidade térmica inicial.

A Figura 71b apresenta o comportamento da amostra CPAT, onde nota-se que até 362°C não há perda de massa. Entre 362°C e 504°C ocorre uma única perda de massa (17,19%) em um único evento térmico (413°C). Até o final da análise, isto é, 900°C, a amostra revelou um alto teor de resíduo (82,81%), devido à presença de material inorgânico na forma de fibras de vidro e/ou carga mineral, conforme visualizado nos espectros de FTIR. Ressalta-se que diferentemente do produto nacional, todas as misturas de adesivo perderam massa antes do tubo.

Avaliando curvas de *TGA* de fibras de vidro, epóxi e epóxi reforçado com 2,5% e 5% de fibras de vidro, Alonso *et al.* (2006) notaram que à medida que se incorporam as fibras na matriz polimérica há uma diminuição de perda de massa inicial, visto que estas fibras apresentam menos de 5% de perda de massa a 900°C, em conformidade com os resultados aqui apresentados referentes ao alto teor de resíduo remanescente no compósito. Cabe salientar que a alta taxa de resíduo presente no material importado difere bastante daquela apresentada pelo tubo nacional (37,58%, Figura 68b), além da maior estabilidade térmica a altas temperaturas. Baseado nos teores de resíduo de ambos os fabricantes, pode-se dizer também que o tubo importado possui maior teor de fibra de vidro e/ou carga mineral. Comparando-se o adesivo e o tubo importados percebe-se a incompatibilidade entre estes materiais com relação à degradação térmica.

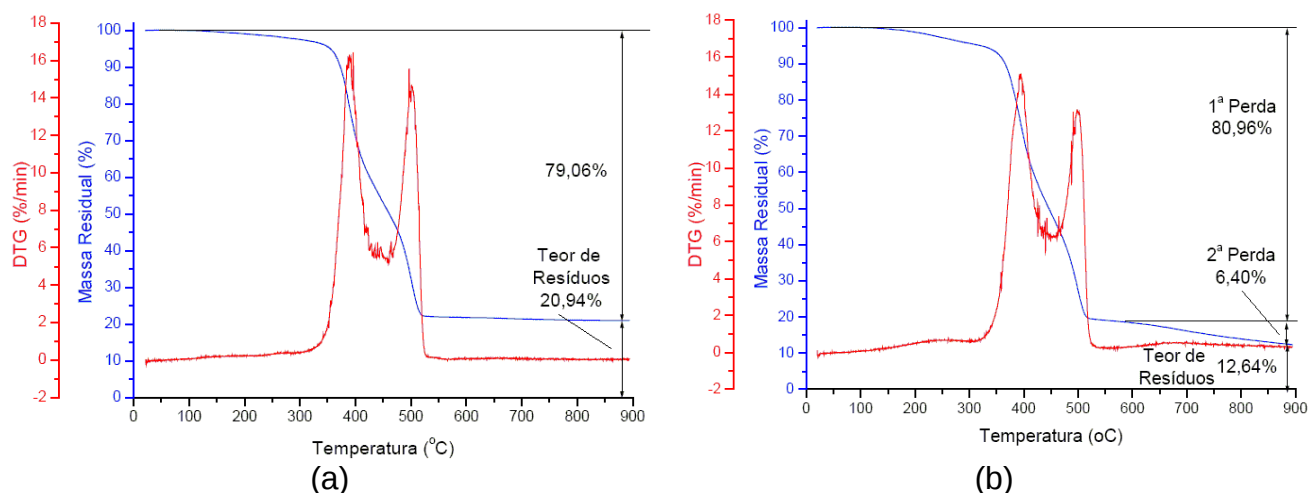


Figura 70 – Curvas *TGA* e *DTG* das amostras: (a) CPA40A60B; (b) CPA50A50B.

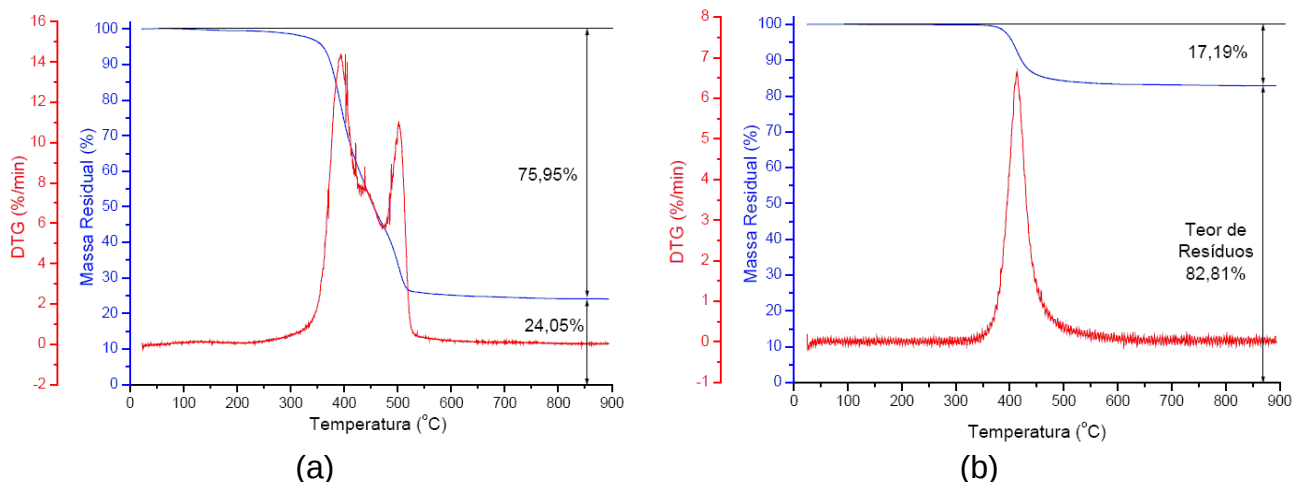


Figura 71 – Curvas *TGA* e *DTG* das amostras: (a) CPA60A40B; (b) CPAT.

3.1.3 Análise termodinâmico-mecânica (DMTA)

As Figuras 72a e 72b apresentam, respectivamente, as curvas G' e $\tan \delta$, do produto nacional. Da Figura 72a observa-se que, em temperatura ambiente, as amostras CPET, CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B apresentaram módulo de cisalhamento (G') de, respectivamente, 1,97 GPa, 0,20 GPa, 1,89 GPa e 2,43 GPa. Desta forma, a utilização da estequiometria de 50% de resina e 50% de catalisador se mostra como a mais eficaz, tal qual como indicada pelo fabricante. Contudo, em temperaturas da ordem de 50°C há início de degradação de todas as amostras de adesivo em comparação com a amostra de tubo, sobretudo aquela com menor quantidade de resina (CPE40A60B) que, por sua vez, possui baixa rigidez inicial e se degrada antes do que as demais. Foi observado que a rigidez da amostra CPET reduz a 0,25 GPa por volta de 89°C, mantendo este patamar até o final da análise. Por outro lado, as amostras de adesivo reduzem a cerca de 0,02 GPa nas temperaturas de 30°C (CPE40A60B), 50°C (CPE50A50B) e 60°C (CPE60A40B).

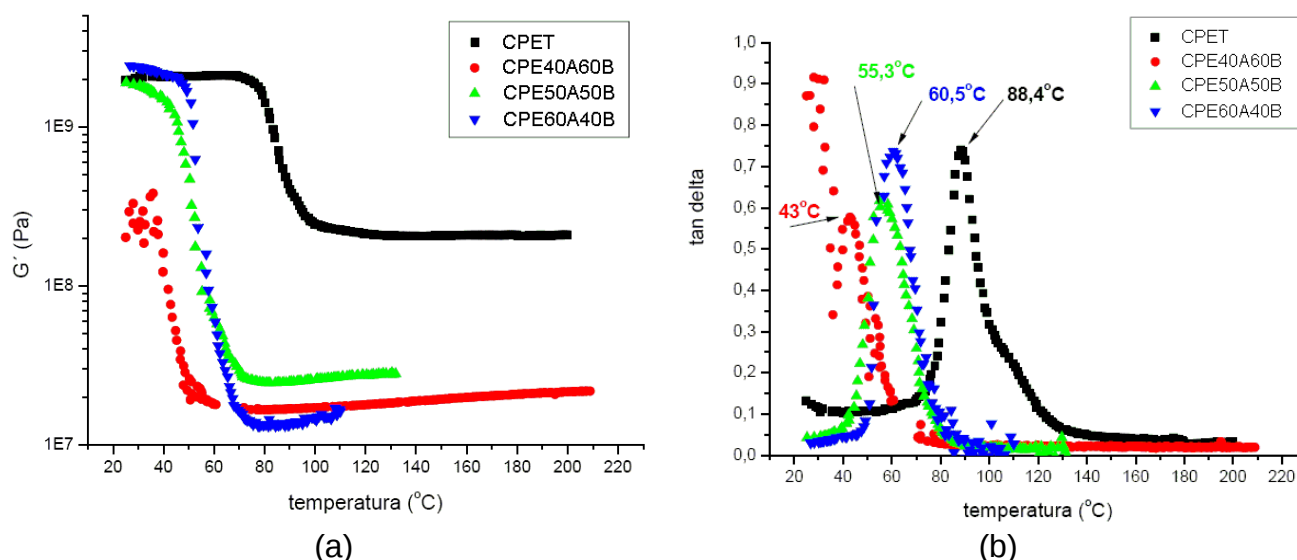


Figura 72 – DMTA para as amostras CPET, CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B: (a) curvas G' ; (b) curvas $\tan \delta$ (G''/G').

Os picos da Figura 72b representam a temperatura de transição vítrea (T_g) dos materiais. Cabe destacar que quando os polímeros atingem a T_g , as propriedades físicas destes, tais como viscosidade, capacidade calorífica, módulo de elasticidade, coeficiente de fricção e coeficiente de expansão térmica, variam bruscamente (Chawla, 1998; Rotheiser, 2004). Da Figura 72 nota-se que a rigidez do tubo é reduzida

sensivelmente em torno de 70°C devido a sua T_g ser de 88,4°C, sendo ainda superior às das demais amostras. Outro fato relevante é que, mesmo em temperaturas acima da T_g , a amostra CPET manteve uma rigidez bem superior as das amostras de adesivo.

As Figuras 73a e 73b apresentam, respectivamente, as curvas G' e $\tan \delta$ do produto importado. Percebe-se que na temperatura ambiente a amostra CPAT apresentou módulo de cisalhamento igual a 2,5 GPa (Figura 73a); ou seja, 25% superior ao valor apresentado pelo produto nacional (Figura 72a).

O adesivo que mais se aproximou da amostra de tubo (CPET) foi o CPA60A40B (1,0 GPa), diferentemente do nacional (CPE50A50B, Figura 72a). Salienta-se que o fabricante internacional prescreve a mistura dos componentes em volume; então, foram medidas as massas destes, sendo possível verificar a partir da massa específica do epóxi que a proporção da amostra CPA60A40B é a que mais se aproxima do especificado pelo fabricante. Por outro lado, as amostras CPA40A60B e CPA50A50B apresentaram, respectivamente, G' iguais a 0,66 GPa e 0,60 GPa.

No decorrer da análise a amostra de tubo perde rigidez somente a 150°C, mantendo assim 1,0 GPa; isto é, um valor ainda significativo, diferentemente do similar nacional que perdeu cerca de 87% de sua rigidez inicial a 89°C. Por outro lado, comparando-se o tubo importado com suas misturas adesivas, percebe-se que estas perderam bruscamente rigidez por volta de 60°C.

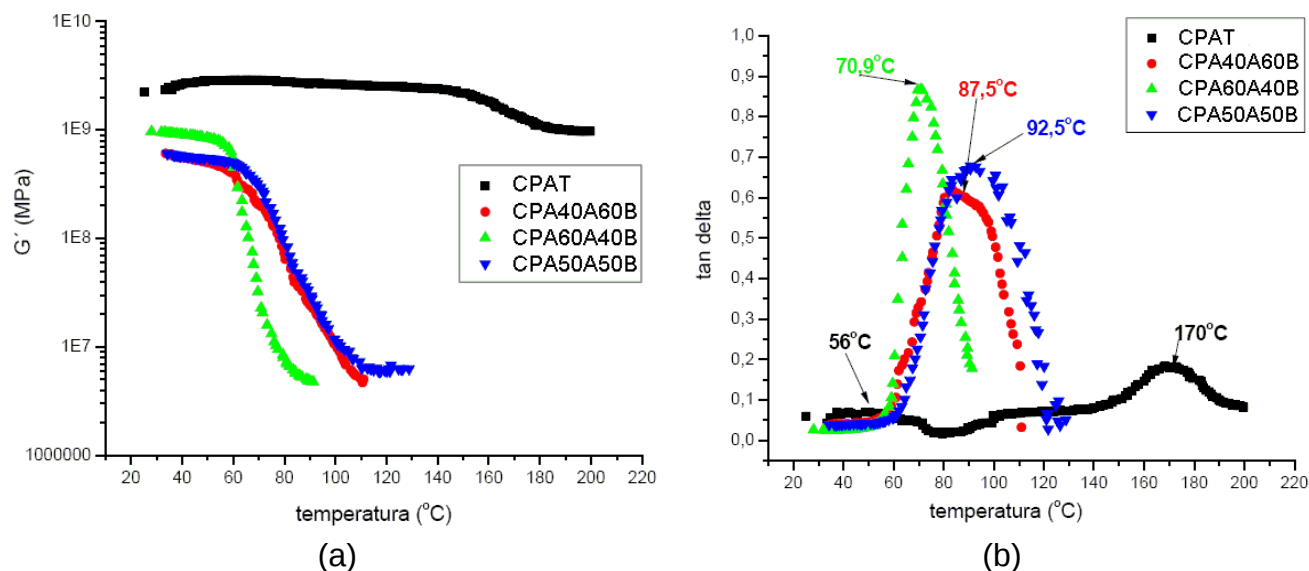


Figura 73 – DMTA das amostras CPAT, CPA40A60B, CPA60A40B e CPA50A50B: (a) curvas G' ; (b) curvas $\tan \delta$ (G''/G').

Da Figura 73b é possível se obter a temperatura de transição vítrea (T_g) das amostras analisadas. Nota-se que a rigidez do tubo sofre uma redução próxima da temperatura de transição vítrea (170°C) que, por sua vez, é significativamente superior às aquelas apresentadas pelos adesivos, sendo ainda bem superior ao produto nacional (Figura 72b). Cabe ressaltar que as T_g obtidas no trabalho para o produto importado são similares aos resultados encontrados por Laza *et al.* (1998) que verificou a variabilidade deste parâmetro com a quantidade de catalisador. Desta forma fica evidente, além dos resultados de TGA, a incompatibilidade termo-mecânica entre os tubos e os adesivos de ambos os fabricantes nas temperaturas de serviço de tubulações de PRFV.

3.1.4 Temperatura de amolecimento de Vicat

Para as amostras de ambos os fabricantes, no caso de um carregamento de $10 \pm 0,2$ N e taxa de aquecimento de $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$ foi observado que a temperatura de amolecimento de Vicat era superior ao limite de trabalho do equipamento, ou seja, acima de 250°C . As Tabelas 20 e 21 apresentam, respectivamente, os resultados de temperatura de amolecimento de Vicat média (T_{vm}) do produto nacional e do produto importado no caso de carregamento de $50 \pm 1,0$ N e taxa de aquecimento de $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$.

Os resultados de T_{vm} do produto nacional (Tabela 20) confirmam a incompatibilidade térmica entre os adesivos (CPE40A60B, CPE50A50B e CPE60A40B) e seu respectivo tubo (CPET) das juntas coladas de sistemas de tubulações de PRFV. Percebe-se que o sistema adesivo (resina + catalisador) que mais se aproxima do tubo em termos de rigidez é aquele já utilizado pelo fabricante, isto é, 50% de resina e 50% de catalisador; todavia, sua rigidez é bem inferior àquela apresentada pelo tubo.

Da Tabela 21, percebe-se que a elevada rigidez do tubo de PRFV importado não permitiu determinar o T_v da amostra. Por outro lado, os adesivos apresentaram um T_{vm} muito inferior ao limite do equipamento. Ainda observa-se pelos resultados, que com uma maior quantidade de catalisador maior foi o T_{vm} , indicando maior rigidez a penetração com a elevação de catalisador. Ainda, segundo os resultados de Vicat, pode-se afirmar do ponto de vista termomecânico, que as misturas adesivas estão mais

próximas entre si do que ao seu respectivo tubo, concordando com os resultados de degradação (*TGA* e *DMTA*) até então apresentados.

Finalmente, comparando-se o produto nacional com o produto importado, com base nos ensaios de caracterização, ficou evidente que seus respectivos adesivos não possuem compatibilidade termomecânica com os tubos em juntas coladas de PRFV.

Tabela 20 – Temperatura de amolecimento de Vicat média (T_{vm}) para carregamento de $50 \pm 1,0$ N e $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$ para o caso do produto nacional.

Nomenclatura	T_{vm} ($^\circ\text{C}$)
CPE40A60B	73,3
CPE50A50B	103,3
CPE60A40B	71,4
CPET	174,9

Tabela 21 – Temperatura de amolecimento de Vicat média (T_{vm}) para carregamento de $50 \pm 1,0$ N e $120 \pm 10^\circ\text{C/h}$ para o caso do produto importado.

Nomenclatura	T_{vm} ($^\circ\text{C}$)
CPA40A60B	80,1
CPA50A50B	79,3
CPA60A40B	65,3
CPAT	> 250

3.2 Ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura

No tópico anterior foi verificado que os adesivos dos diferentes fabricantes apresentaram desempenho termomecânico insatisfatório quando comparados com as tubulações dos respectivos fabricantes. Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de tração uniaxial dos adesivos com variação de temperatura. Os ensaios foram efetuados naqueles adesivos que apresentaram melhor resultado na caracterização, isto é, 50%A-50%B para o adesivo nacional e 60%A-40%B para o adesivo importado, que são as proporções preconizadas pelos fabricantes.

As Figuras 74 a 78 apresentam os resultados obtidos no que tange aos valores médios dos parâmetros tensão de escoamento (σ_{esc}), tensão de ruptura (σ_{rup}), deformação de escoamento (ε_{esc}), deformação de ruptura (ε_{rup}) e módulo de elasticidade (E) além das respectivas dispersões. Destaca-se que no Apêndice I ainda encontram-se

as curvas tensão-deformação dos adesivos nas diversas temperaturas avaliadas e um resumo geral destes parâmetros obtidos para cada fabricante.

Dos resultados, pode-se dizer que em um primeiro momento, os valores de interesse são E , relacionado à rigidez, e σ_{esc} que fornece o limite a partir do qual tensões geram deformações irreversíveis no material. A deformação de escoamento (ϵ_{esc}) é aquela verificada quando se atinge a tensão de escoamento e, a deformação de ruptura (ϵ_{rup}) é aquela verificada quando se atinge a ruptura do corpo-de-prova.

A alta de rigidez obtida (8,24 GPa, Figura 78) concorda com os resultados das análises de *DMTA* com relação à rigidez à torção, isto é, módulo de cisalhamento de 1,89 GPa a 25°C (Figura 72a). A deformação de escoamento obtida foi de 0,22% (Figura 75) e a de ruptura foi de 1,47% (Figura 77) demonstrando que à temperatura ambiente o adesivo nacional admitiu elevados níveis de deformação a partir de seu escoamento.

Ainda vale a pena destacar que σ_{esc} igual a 9,29 MPa possui elevada margem de segurança em relação ao carregamento admissível de juntas coladas, sob pressões de serviço, de plataformas marítimas de aproximadamente 2,00 MPa para tubulações de 100 mm (Edra do Brasil, 2006a). Entretanto, o valor obtido reporta-se à temperatura ambiente (25°C), além de considerar somente carregamento trativo.

Cabe ressaltar que ensaios de cisalhamento em adesivos de resina estérvinílicas curadas com poliamida efetuados a 25°C por Brum (2002), indicaram tensão de ruptura entre 7,2 MPa e 8,6 MPa, valores superiores a pressão de serviço em tubulações de PRFV e distintos dos obtidos na presente dissertação devido à metodologia de ensaio ser totalmente distinta, pois enquanto um ensaio submete o adesivo a tração ou outro submete o mesmo ao cisalhamento.

No que tange ao adesivo importado, observa-se que a 25°C, o adesivo possui maior tensão de escoamento ($\sigma_{esc} = 11,14$ MPa) que o nacional ($\sigma_{esc} = 9,29$ MPa), embora ambas apresentem larga folga de resistência mecânica nesta temperatura. Todavia o adesivo importado é bem menos rígido que o nacional (Figura 78) embora apresente um valor significativo que também foi observado nas análises de *DMTA* (Figura 73a). A deformação de escoamento do adesivo importado foi de 0,30% e a de ruptura foi de 1,03% demonstrando que à temperatura ambiente este admitiu elevados níveis de deformação a partir de seu escoamento (Figuras 75 e 77). Conforme a Figura

76, ressalta-se que a maior rigidez do adesivo nacional também pode ser evidenciada pela sua resistência à tração (σ_{rup}), aproximadamente 1,6 vezes superior ao adesivo importado.

A partir da temperatura de 55°C, conforme pode ser visto na Figura 74, observa-se que o adesivo nacional tem redução de σ_{esc} de 9,29 MPa para 8,60 MPa, indicando, ainda, uma situação de segurança para a temperatura de 55°C. Entretanto, E reduz-se de 8,24 GPa para 1,10 GPa, havendo uma queda de rigidez de 8 vezes (Figura 78). Esta queda de rigidez também foi verificada nos resultados de *DMTA* com relação ao módulo de cisalhamento, isto é, queda de 1,89 GPa a 25°C para 0,30 GPa a 50°C (Figura 72a). Cabe lembrar que a temperatura de transição vítrea deste adesivo obtida anteriormente foi de cerca de 55°C (Figura 72b).

Da Figura 76 verifica-se que resistência a tração teve redução da ordem de 4,5 vezes. No que tange às deformações (Figuras 75 e 77) percebe-se que assim como a rigidez reduziu bastante, a deformação de escoamento elevou-se 4 vezes à temperatura de 55°C do que aquela verificada à temperatura ambiente. Por outro lado, como a tensão de ruptura caiu 4 vezes a deformação de ruptura verificada à 55°C foi de quase 3 vezes. Assim, mesmo para um σ_{esc} satisfatório, o sistema pode colapsar pelo efeito conjugado de esforços trativos, compressivos e torcionais, já a 55°C.

Com relação ao adesivo importado, na temperatura de 55°C a tensão de escoamento (σ_{esc}) elevou-se para 15,75 MPa, isto é, duas vezes mais resistente que o nacional (Figura 74). Este ganho de resistência pode estar associado aos efeitos de polimerização secundária, que ocorreram parcialmente durante a cura a temperatura ambiente. Da Figura 78 observa-se que a rigidez sofreu uma leve redução de 5,65 GPa para 4,82 GPa, assim pode-se dizer que diferentemente do nacional, o sistema importado estaria plenamente seguro para trabalhar à 55°C pois tanto a rigidez quanto a tensão de escoamento estão acima dos limites satisfatórios. Contudo, reportando-se aos resultados de *DMTA* apresentados anteriormente, observou-se que a rigidez à torção reduziu cerca de 90% do valor à temperatura ambiente a partir de 60°C (Figura 73a). Visto que a rigidez sofreu um pequeno decréscimo de magnitude a 50°C, foi verificado que nesta temperatura o adesivo apresentou ϵ_{esc} e ϵ_{rup} iguais a 0,30% e 1,36%, respectivamente, não muito diferentes daqueles observados à temperatura ambiente.

Da Figura 78, cabe dizer que na temperatura de 55°C ocorre claramente uma inversão no comportamento dos adesivos no que tange ao módulo de elasticidade em relação a temperatura de 25°C, onde o adesivo importado é quatro vezes mais rígido que o adesivo nacional ($E=4,84\text{GPa}$ contra $E=1,10\text{GPa}$), sendo portanto, mais seguro o adesivo importado. Nesta mesma temperatura, quando se analisa a deformação de escoamento (Figura 75), é observado que o adesivo nacional deforma-se duas vezes mais que o importado ($\varepsilon_{esc}=0,88\%$ contra $\varepsilon_{esc}=0,43\%$), reforçando a condição de maior segurança do adesivo importado, o que era de se esperar, já que sendo quatro vezes mais rígido, deforma-se menos.

Na temperatura de serviço das juntas coladas das tubulações de PRFV, isto é, a 85°C com transientes térmicos de até 115°C, observa-se queda de σ_{esc} para 5,50 MPa e 2,77 MPa, respectivamente, sendo a rigidez bruscamente reduzida (Figuras 74 e 78). Dos resultados obtidos para o adesivo nacional, o prognóstico é de que este somente apresenta segurança de uso até temperaturas de 55°C, de acordo com os ensaios de tração com variação de temperatura, além das análises de degradação (*TGA*, *DMTA* e *Vicat*).

No caso do adesivo importado, a 85°C a tensão de escoamento (σ_{esc}) reduz a 5,81 MPa, sendo ainda 2,5 vezes superior ao carregamento de serviço (Figura 74). Entretanto, a rigidez do sistema é totalmente perdida, conforme pode ser visualizado na Figura 78. Desta forma, é desaconselhável o uso destes adesivos a temperaturas da ordem de 85°C. Todavia, reportando-se aos resultados obtidos para rigidez a torção nas análises de *DMTA*, seria mais seguro não ultrapassar o limite de 55°C, uma vez que a T_g do adesivo observada foi de 70,9°C e a 60°C o mesmo perde a sua rigidez por completo (Figura 73).

Por meio de ensaio de tração longitudinal e transversal às fibras de compósito de matriz epoxídica, Cunha *et al.* (2006) observaram redução de desempenho mecânico de até 50% quando este era submetido a temperatura de 80°C, concordando com os resultados obtidos no presente trabalho. A temperatura de 115°C a situação é, obviamente, ainda mais crítica, onde o emprego do adesivo torna-se impraticável. Diante deste quadro, similarmente ao adesivo nacional, o adesivo importado pode ser utilizado com segurança até 55°C, sob o ponto de vista dos ensaios trativos e de degradação (*TGA*, *DMTA* e *Vicat*).

Desta forma, por meio da caracterização e dos ensaios trativos pode-se afirmar que os adesivos estudados possuem desempenho termomecânico muito inferior que os tubos que decerto prejudicarão a funcionalidade do sistema em uma junta colada de PRFV.

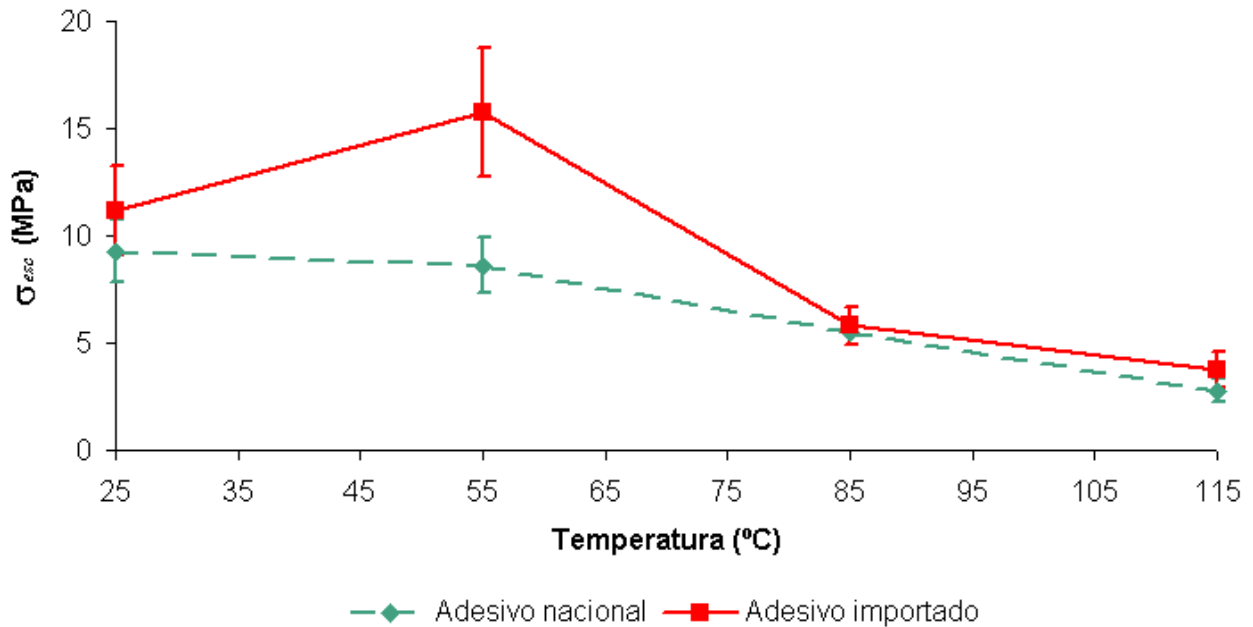


Figura 74 – Variação da tensão de escoamento dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

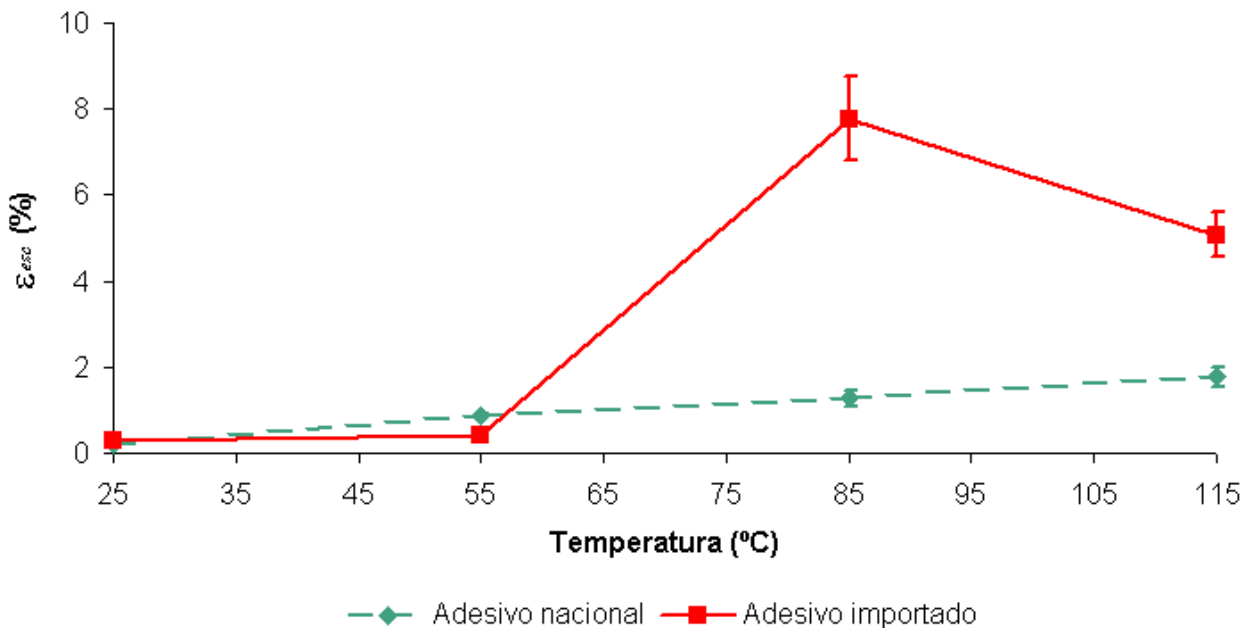


Figura 75 – Variação da deformação de escoamento dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

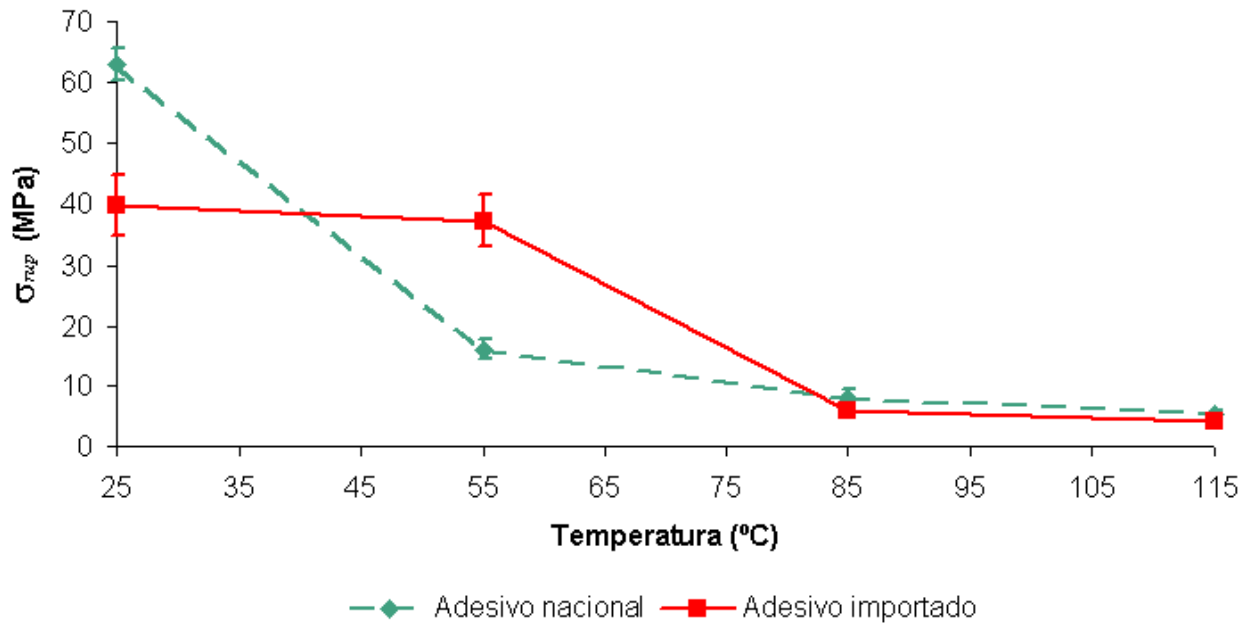


Figura 76 – Variação da tensão de ruptura dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

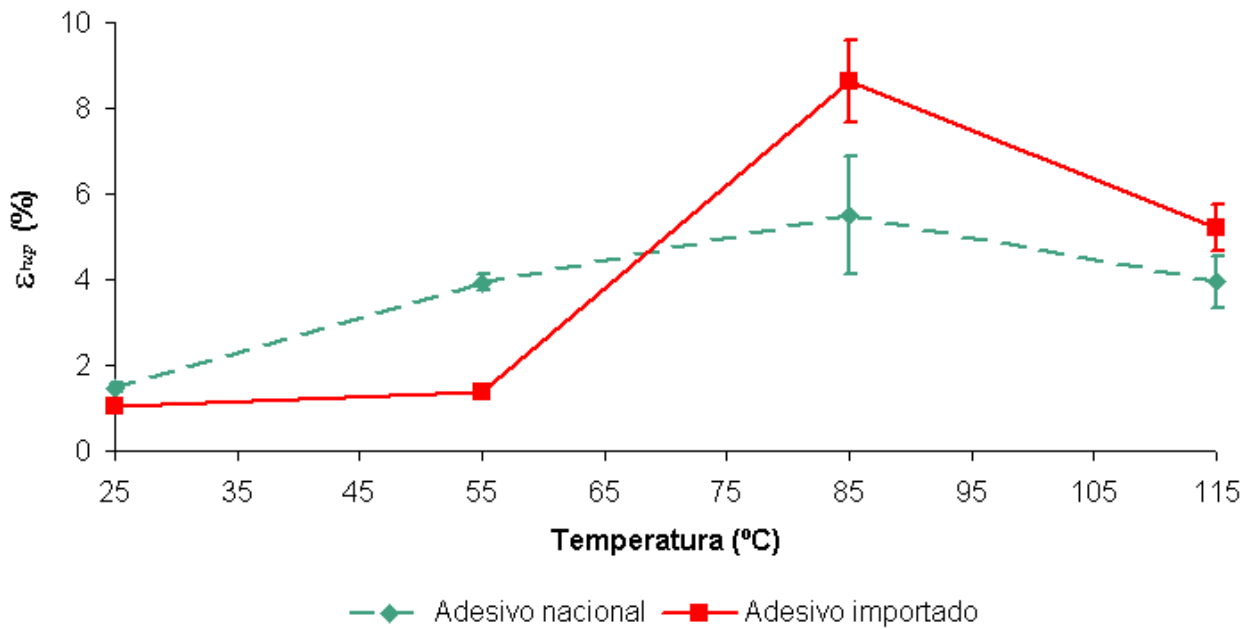


Figura 77 – Variação da deformação de ruptura dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

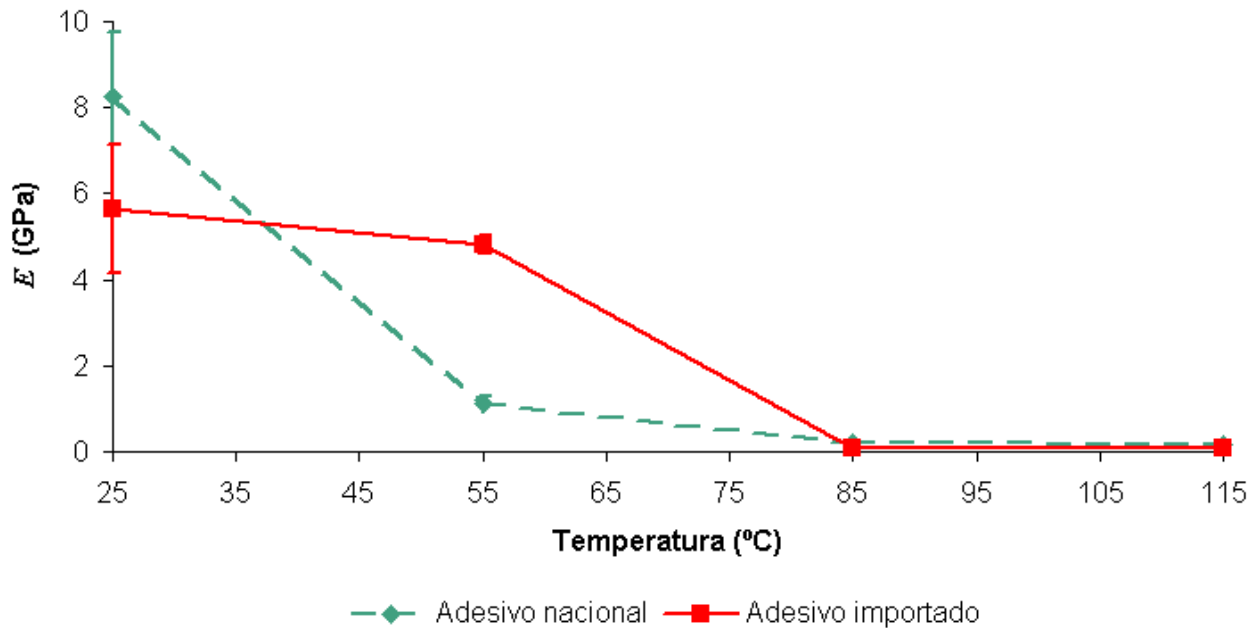


Figura 78 – Variação do módulo elástico dos adesivos em função da temperatura e suas respectivas dispersões.

3.3 Ensaios hidrostáticos com variação de temperatura

No tópico anterior foi verificado o comportamento dos adesivos dos diferentes fabricantes frente ao ensaio de tração uniaxial com variação de temperatura, onde, em suma, pôde-se perceber que os adesivos têm uma elevada redução de desempenho mecânico a temperatura da ordem de 55°C. Ressalta-se que nos ensaios de tração os adesivos sofreram aquecimento diretamente de um forno resistivo. Como nas tubulações de PRFV o fluido passante é que possui temperatura de serviço da ordem de 85°C, com transientes térmicos de 115°C, não se sabe ao certo como seria o desempenho de uma junta colada quando submetida a este fluxo de fluido. Para tanto, neste tópico são apresentados os resultados obtidos para os ensaios hidrostáticos de juntas coladas de tubulações de PRFV submetidas à pressão e temperatura de até 85°C, com o monitoramento destas além dos deslocamentos e deformações das juntas. Com o intuito de comparação foi realizado também este ensaio em juntas laminadas do produto nacional além das juntas coladas.

3.3.1 Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em juntas coladas de tubulações de PRFV

A Figura 79 apresenta a estimativa do tempo de estabilização de temperatura em tubulações de PRFV do produto nacional, quando a água está submetida a 85°C. A situação A refere-se ao caso estudado com um setor de tubo de PRFV do fabricante nacional, onde pode-se visualizar que a água foi mantida à temperatura de 85°C (TIT), sendo monitorada a temperatura na parede externa do tubo (TFT). Percebe-se que a partir de pouco menos de 30 minutos de ensaio a temperatura encontrava-se estabilizada em cerca de 64°C, isto é, houve uma dissipação de energia térmica traduzida em queda de temperatura de aproximadamente 21°C na parede do tubo avaliado, sendo que por volta de 1 hora o ensaio foi encerrado.

Por outro lado, a situação B refere-se a circulação de água a 85°C em um corpo-de-prova colado proveniente do fabricante nacional, conforme apresentado na Figura 39. Foram monitoradas a temperatura da água do reservatório (TR), a temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT) e a temperatura na parede externa da luva (TFL) pelos termopares TR, TTS e TCT, respectivamente.

Considerando que os materiais são compósitos de matriz epoxídica reforçada por fibras de vidro, excetuando-se o adesivo, e que a espessura deste último²³ é muito inferior que as demais, por meio das Equações 15 e 16 pode-se estimar a temperatura na face do tubo (TFT) e do adesivo (TFA). Nas Equações, e é espessura e t , a e l indicam, respectivamente, tubo, adesivo e luva.

$$TFT = TIT - (TIT - TFL) \cdot \frac{e_t}{(e_t + e_a + e_l)} \quad (15)$$

$$TFA = TFL + (TIT - TFL) \cdot \frac{e_l}{(e_t + e_a + e_l)} \quad (16)$$

Dos resultados, nota-se uma oscilação de $\pm 2^\circ\text{C}$ na temperatura da água do reservatório (TR) devido ao funcionamento do contator de ligamento/desligamento da

²³ Para o produto nacional, a espessura média do adesivo foi de 0,23 mm, a espessura média do tubo foi de 6,9 mm e a espessura média da luva foi de 10,05 mm.

resistência térmica conforme estipulado no *software* de ensaio, assim como uma oscilação na temperatura da água na saída do corpo-de-prova (TIT) devido ao funcionamento da bomba elétrica em um ciclo de ligamento/desligamento por meio do contator a cada 5 minutos, sendo estes gerenciados pela placa de controle (PC).

Verifica-se que a partir de 2 horas e 30 minutos de decorrido o ensaio, a temperatura da água no corpo-de-prova (TIT) e na face da luva (TFL) atingem a estabilização a uma temperatura média de 76°C e 47°C, respectivamente.

Nota-se também que a perda térmica entre o interior do corpo-de-prova (TIT) e a face externa do tubo (TFT) foi de cerca de 10°C, indicando sobreposição no desenvolvimento de temperatura deste último com a face do adesivo (TFA), devido a pequena espessura deste último. Desta forma, é possível observar que o adesivo nacional superou a sua temperatura crítica de 55°C verificada nos resultados de caracterização e de tração.

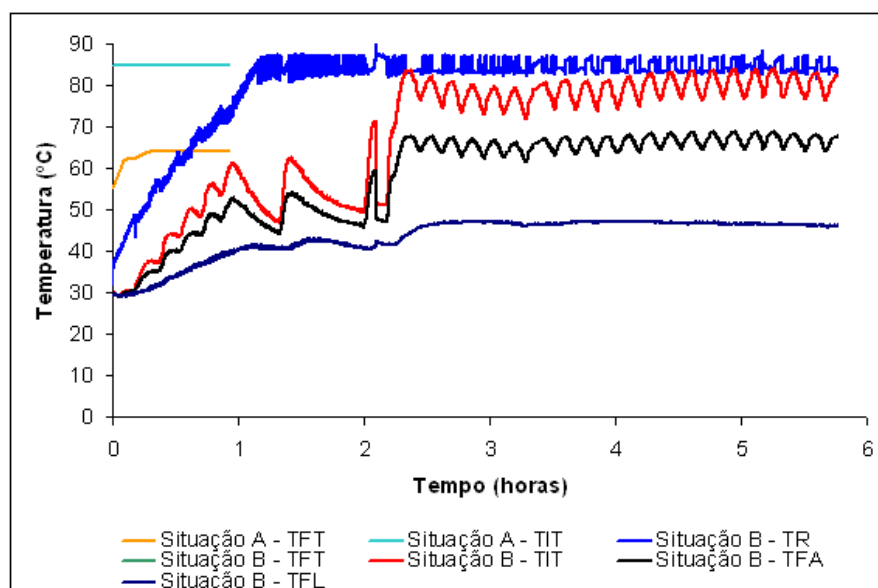


Figura 79 – Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em tubulações de PRFV do fabricante nacional.

Da mesma forma que efetuado no produto nacional, para a realização dos ensaios hidrostáticos com variação de temperatura no produto importado foi necessário *a priori* se determinar o tempo de estabilização de temperatura nos adesivos das juntas deste material. Cabe ressaltar que diferentemente do produto nacional, os adesivos utilizados nos corpos-de-prova importados não foram caracterizados.

Em certo ponto do desenvolvimento dos ensaios optou-se por medir a temperatura na face do tubo (TFT) e estimar a temperatura no interior do corpo-de-prova (TIT), devido a defeito no transdutor TTS. Desta forma, optou-se por medir no canal referente a TTS a temperatura na face do tubo (TFT) por meio do termopar TCTA. Assim, nestes casos, a temperatura no interior do corpo-de-prova (TIT) foi estimada segundo a Equação 17 seguindo as mesmas considerações para a obtenção das Equações 15 e 16²⁴.

$$TIT = TFT + (TFT - TFL) \cdot \frac{e_t}{(e_a + e_l)} \quad (17)$$

Desta forma, a Figura 80 apresenta o desenvolvimento de temperatura no reservatório do ensaio (TR), a temperatura na face do tubo (TFT), e a temperatura na face da luva (TFL) medidas pelos termopares TR, TCTA e TCT, além das estimativas de TIT e TFA, para a determinação de tempo de estabilização no produto importado.

Da mesma forma que o similar nacional, na Figura 80 observa-se que houve uma oscilação de temperatura no reservatório devido aos ciclos de ligamento e desligamento da resistência térmica e na circulação efetuada pela bomba elétrica de acordo com o estipulado pelo *software* de aquisição de dados.

Verifica-se que por volta de 2 horas e 30 minutos o corpo-de-prova atinge certa estabilização de temperatura na face da luva (TFL) e na face do tubo (TFT) em aproximadamente 46°C e 53°C. Neste momento foi estimado que a temperatura no interior do corpo-de-prova (TIT) era de aproximadamente 56°C. Por outro lado, devido à pequena espessura de adesivo quando comparada a espessura dos outros materiais, o desenvolvimento da temperatura na face do adesivo (TFA) sobrepôs o desenvolvimento na face do tubo (TFT), assim a temperatura verificada neste ponto foi de aproximadamente 53°C.

Nota-se que no momento da estabilização houve uma perda térmica da ordem de 24°C do reservatório (TR) para o interior do corpo-de-prova (TIT) e do mesmo para o adesivo da ordem de 28°C. Verifica-se assim que as perdas no produto importado foram maiores que aquelas verificadas no produto nacional, conforme pode ser

²⁴ Destaca-se que as espessuras dos materiais do produto importado nas Equações foram de 5,33 mm, 0,17 mm e 10,27 mm para tubo, adesivo e luva, respectivamente.

visualizado na Tabela 22. Com os resultados aqui apresentados optou-se por iniciar a etapa de pressurização com mais de 2 horas e 30 minutos de decorrido o ensaio nos corpos-de-prova nacionais e importados.

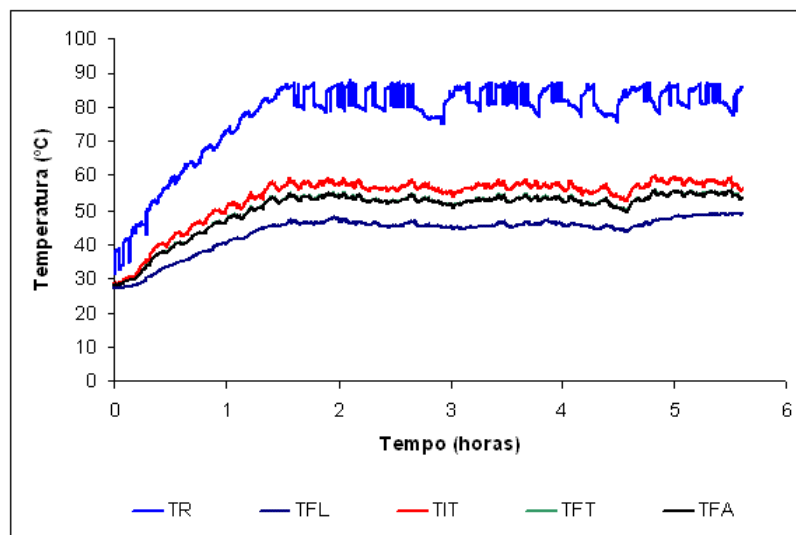


Figura 80 – Estimativa do tempo de estabilização de temperatura em tubulações de PRFV do fabricante internacional.

Tabela 22 – Temperaturas médias com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL de corpos-de-prova nacionais e importados a 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
Nacional	47	85	76	66	66
Importado	46	85	56	53	53

3.3.2 Monitoramento e estimativa de temperatura nos corpos-de-prova

No que tange a temperatura de equilíbrio, as Tabelas 23 e 24 apresentam o monitoramento de temperatura com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova nacionais e importados a 85°C. Salienta-se que encontra-se no Apêndice III as curvas de monitoramento de temperatura de todos os corpos-de-prova ensaiados.

Destaca-se que a partir do corpo-de-prova CPE4C85 a temperatura na face do tubo (TFT) passou a ser monitorada e a temperatura no interior do corpo-de-prova (TIT) passou a ser estimada por meio da Equação 17.

No caso dos corpos-de-prova nacionais, a estabilização na face da luva se deu com aproximadamente 44,8°C. Por meio das curvas de monitoramento de temperatura

apresentadas no Apêndice III, observa-se que o equilíbrio de temperatura na face da luva (TFL) se deu com aproximadamente 2 horas e 30 minutos de ensaio.

Da Tabela 23 nota-se também que enquanto na face do tubo (TFT) apresenta-se a temperatura média de 57,0°C nos adesivos (TFA) tem-se a temperatura média de 56,8°C, indicando assim que o adesivo do produto nacional ultrapassa o seu limite de aplicabilidade previsto nos ensaios de caracterização e de tração uniaxial de adesivos.

Por outro lado, nos corpos-de-prova importados (Tabela 24), observa-se que a estabilização na face da luva (TFL) se deu com a temperatura média de 50,5°C, indicando que as luvas importadas absorveram maior magnitude de energia térmica que os similares nacionais.

Da Tabela 24 verifica-se também que embora a temperatura média do reservatório tenha sido de 84,1°C a temperatura média do adesivo foi de 54,7°C, indicando ainda uma proximidade entre este valor ao limite de aplicabilidade do adesivo RP-60B caracterizado neste trabalho (50°C a 55°C). Contudo, salienta-se que o adesivo utilizado nos corpos-de-prova importados foi do tipo PSX-60 que possui carga e coloração distinta ao RP-60B caracterizado na presente dissertação.

Tabela 23 – Temperaturas com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPE1C85	44,0	84,9	67,5	58,1	57,8
CPE2C85	44,9	84,0	65,4	57,2	56,9
CPE3C85	47,5	85,2	64,7	57,8	57,6
CPE4C85	42,6	81,1	63,5	55,1	54,8
Média ²⁵	44,8	83,8	65,3	57,0	56,8
Desvio	2,1	1,9	1,7	1,3	1,3

Tabela 24 – Temperaturas com 2 horas e 30 minutos de estabilização em TFL dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPA1C85	48,1	85,5	57,2	54,1	54,0
CPA2C85	51,9	83,6	59,2	56,7	56,6
CPA3C85	51,6	83,2	54,5	53,5	53,5
Média	50,5	84,1	56,9	54,8	54,7
Desvio	2,1	1,2	2,3	1,7	1,7

²⁵ Média e Desvio são, respectivamente, média aritmética e desvio-padrão dos corpos de prova ensaiados.

As Tabelas 25 e 28 apresentam o monitoramento de temperatura nos corpos-de-prova ao final do ensaio, assim como a perda térmica verificada desde o momento da estabilização ao final do ensaio dos corpos-de-prova submetidos a temperatura de 85°C.

No caso do produto nacional, verifica-se que em todos os corpos-de-prova os adesivos se mantiveram na temperatura verificada na estabilização exceto o CPE3C85, pois neste o tempo de pressurização foi mais longo não se permitindo assim a circulação de água quente, contudo, ficaram todos os corpos-de-prova com valores bem próximos ou superiores ao limite de aplicabilidade dos adesivos mencionado anteriormente, isto é, temperatura entre 50°C e 55°C (Tabelas 25 e 26).

Das Tabela 27 e 28, com relação ao produto importado, todos os corpos-de-prova indicaram elevada perda térmica porque nestes foi necessário se utilizar um tempo maior de pressurização dos corpos-de-prova, impossibilitando-se desta forma a circulação de água quente. Todavia, a partir dos valores observados, ao final dos ensaios os corpos-de-prova estão submetidos a temperatura considerável (média de 42,7°C).

Tabela 25 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPE1C85	46,3	83,9	62,8	56,2	56,0
CPE2C85	46,5	84,0	59,8	54,5	54,3
CPE3C85	43,0	81,9	46,1	44,9	44,8
CPE4C85	44,3	80,5	57,0	51,9	51,7
Média	45,0	82,6	56,4	51,9	51,7
Desvio	1,7	1,7	7,3	5,0	4,9

Tabela 26 – Perda térmica nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de a 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPE1C85	2,3	1,0	4,7	1,9	1,8
CPE2C85	1,6	0,0	5,6	2,7	2,6
CPE3C85	4,5	3,3	18,6	12,9	12,8
CPE4C85	1,7	0,6	6,5	3,2	3,1
Média	2,5	1,2	8,8	5,2	5,1
Desvio	1,4	1,4	6,5	5,2	5,2

Tabela 27 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPA1C85	41,4	80,7	45,5	44,1	44,1
CPA2C85	41,0	73,7	43,7	42,8	42,8
CPA3C85	40,4	79,5	41,8	41,3	41,3
Média	40,9	78,0	43,7	42,7	42,7
Desvio	0,5	3,7	1,9	1,4	1,4

Tabela 28 – Perda térmica nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPA1C85	6,7	4,8	11,7	10,0	9,9
CPA2C85	10,9	9,9	15,4	13,9	13,9
CPA3C85	11,2	3,7	12,7	12,2	12,2
Média	9,6	6,1	13,3	12,0	12,0
Desvio	2,5	3,3	1,9	2,0	2,0

No que tange os corpos-de-prova submetidos a temperatura ambiente nas Tabelas 29 e 30 verifica-se que o reservatório apresentou temperatura maior que em todas as outras regiões monitoradas ou estimadas (entre 5°C e 7°C), indicando que tais valores correspondem a perda térmica do reservatório para o corpo-de-prova e para os demais constituintes do equipamento de ensaio. Nota-se que os adesivos se mantiveram a uma temperatura média entre 27°C e 29°C.

Tabela 29 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPE1CAMB	28,9	37,2	28,2	28,2	28,3
CPE2CAMB	27,2	32,9	27,9	27,9	27,8
CPE3CAMB	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
Média	27,9	32,6	27,9	27,9	27,9
Desvio	0,9	4,8	0,3	0,3	0,3

Tabela 30 – Temperaturas no final do ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	TFL (°C)	TR (°C)	TIT (°C)	TFT (°C)	TFA (°C)
CPA1CAMB	27,7	34,8	28,0	27,9	27,9
CPA2CAMB	30,5	38,5	31,4	31,1	31,1
CPA3CAMB	27,3	33,8	27,8	27,6	27,6
Média	28,5	34,8	29,1	28,9	28,9
Desvio	1,7	3,3	2,0	1,9	1,9

Com referência aos corpos-de-prova nacionais laminados, fez-se necessário determinar uma Equação para a estimativa da temperatura no interior do corpo-de-prova (TIT). Desta forma, tem-se a partir das espessuras²⁶ do tubo (e_t) e do laminado (e_{la}), além da temperatura face do laminado (TFLA) e da temperatura na face do tubo (TFT) o seguinte:

$$TIT = TFLA + (TFT - TFLA) \cdot \left(\frac{e_{la} + e_t}{e_{la}} \right) \quad (18)$$

Da Figura 81, observa-se que mesmo antes da pressurização houve oscilação de $\pm 10^\circ\text{C}$ nos diversos pontos medidos e que no reservatório a água foi mantida em cerca de 85°C por quase todo o ensaio. Nota-se ainda que durante todo o ensaio, as temperaturas no interior do corpo-de-prova (TIT) e na face do tubo (TFT) apresentaram quase uma sobreposição no seu desenvolvimento com a evolução do ensaio, sendo isto verificado pela pouca espessura de tubo, diferentemente do laminado.

Salienta-se ainda que no momento da pressurização, isto é, por volta de 5 horas de ensaio, as temperaturas no interior do corpo-de-prova (TIT), na face do tubo (TFT) e na face do laminado (TFLA) foram de 55°C , 54°C e 44°C , respectivamente. Na ruptura do corpo-de-prova as temperaturas no interior do corpo-de-prova (TIT), na face do tubo (TFT) e na face do laminado (TFLA) foram de 44°C , 43°C e 41°C , respectivamente.

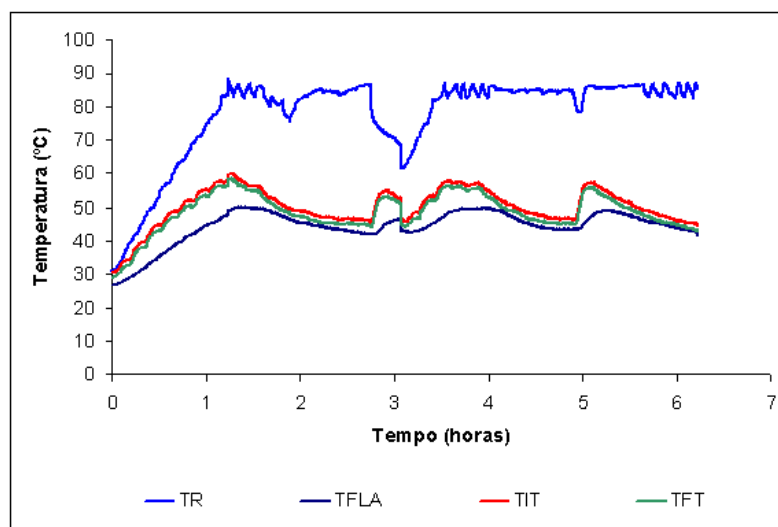


Figura 81 – Monitoramento de temperaturas TR, TFLA, TIT e TFT no corpo-de-prova CPE1L85.

²⁶ A espessura média do laminado e do tubo foram de 11,5 mm e 6,9 mm, respectivamente.

A perda térmica de quase 10°C ocorreu devido a impossibilidade de se circular água na etapa de pressurização. Nota-se desta forma maior oscilação no monitoramento de temperatura na face do tubo (TFT) diferentemente do laminado (TFLA) indicando a maior dificuldade de se ocorrer perda térmica através da espessura deste último.

A Figura 82 apresenta as curvas de temperatura do reservatório (TR), a temperatura na face do laminado (TFLA), a temperatura na face do tubo (TFT), além da temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT) determinada pela Equação 18 de um corpo-de-prova laminado submetido a temperatura ambiente para fins de comparação. Dos resultados verifica-se que da mesma forma que ocorreu com o corpo-de-prova CPE1L85 houve uma pequena oscilação de temperatura nas curvas TFT e TIT. Contudo com o início da pressurização, isto é, 10 minutos de ensaio, as diversas curvas apresentaram certo patamar que se modificou apenas no fim do ensaio.

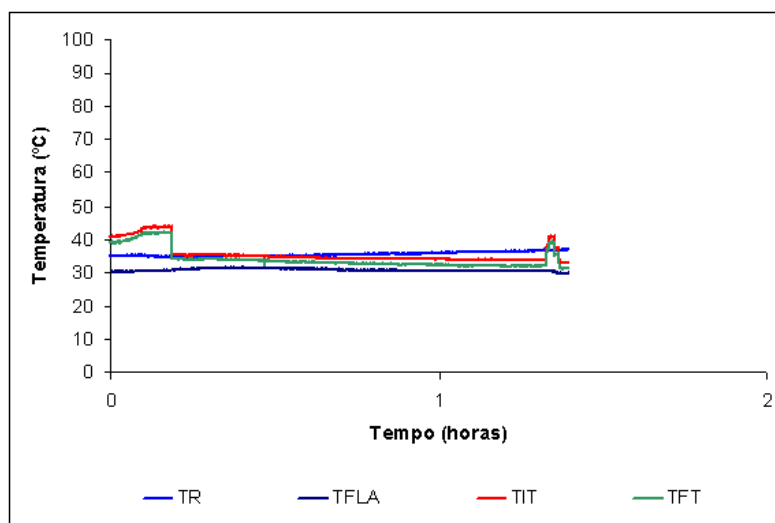


Figura 82 – Monitoramento de temperaturas TR, TFLA, TIT e TFT no corpo-de-prova CPE1LAMB.

3.3.3 Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova

As Tabelas 31 a 33 apresentam a pressão e tensão de ruptura e o tempo de pressurização dos corpos-de-prova nacionais colados e laminados ensaiados a temperatura de 85°C e ambiente. Da mesma forma que efetuado para o monitoramento

de temperatura, no Apêndice IV são apresentadas curvas de desenvolvimento de pressão hidrostáticas nos corpos-de-prova ensaiados. Deve-se ressaltar que todos os corpos-de-prova utilizados no programa experimental foram qualificados seguindo as recomendações da ASTM D 1599 (2005) por cada fabricante, cabendo lembrar que a pressão de serviço de todos os corpos-de-prova ensaiados era de 2,0 MPa.

Da Tabela 31, nota-se que a pressão média de ruptura foi de 3,18 MPa exceto do corpo-de-prova CPE3C85 que rompeu com cerca de 7,61 MPa. O início da pressurização dos corpos-de-prova submetidos a temperatura de 85°C esteve entre 2 horas e 41 minutos e 3 horas e 12 minutos de ensaio. Todos os corpos-de-prova, exceto o CPE3C85, atingiram a ruptura na etapa 2 de pressurização, isto é, pressão aplicada igual a 1,5 vezes a pressão de serviço em um intervalo de 60 minutos. A tensão hidrostática média calculada segundo a ASTM D 1599 (2005) apresentada pela Equação 5 foi de aproximadamente 15,17 MPa.

Tabela 31 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	Pressão máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo de pressurização (min)	Ruptura
CPE1C85	3,11	15,06	4,5	tubo/luva
CPE2C85	3,08	13,82	9,5	tubo/luva
CPE3C85 ²⁷	7,61	34,09	77,4	tubo/luva
CPE4C85	3,35	16,63	11,9	tubo/luva
Média	3,18	15,17	8,6	Média
Desvio	0,14	1,41	3,7	Desvio

Da Tabela 32, verifica-se que a pressão média máxima obtida nos corpos-de-prova submetidos a temperatura ambiente foi de 8,88 MPa, indicando que estes atingiram a ruptura na etapa 3 de pressurização, isto é, pressões superiores a 1,5 vezes a pressão de serviço e tempo de pressurização superior a 60 minutos. Destaca-se que o tempo médio de pressurização foi de 76,2 minutos.

Salienta-se que a pressão média máxima obtida é muito superior ao observado para o caso dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C, indicando redução de desempenho termomecânico de até 65%. As tensões de ruptura calculadas segundo a Equação 5 estiveram entre 41,0 MPa e 50,0 MPa. Destes

²⁷ Amostra desconsiderada na determinação de média e desvio-padrão dos parâmetros obtidos.

resultados pode-se dizer que de acordo com os requisitos da ASTM D 1599 (2005) as juntas coladas do produto nacional estariam qualificadas dentro do intervalo de tempo prescrito pela mesma, isto é 60 segundos, visto que a ruptura ocorreu com tempos de pressurização superiores.

Tabela 32 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	Pressão máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo de pressurização (min)	Ruptura
CPE1CAMB	8,53	41,27	77,1	tubo/luva
CPE2CAMB	8,56	42,52	68,9	tubo/luva
CPE3CAMB	9,56	46,23	82,5	tubo/luva
Média	8,88	43,34	76,2	Média
Desvio	0,59	2,58	6,8	Desvio

Com relação aos corpos-de-prova laminados, da Tabela 33 verifica-se que a temperatura de 85°C (CPE1L85) a máxima pressão observada foi de 8,93 MPa, indicando o desempenho termomecânico superior destes tipos de junta em relação às juntas coladas do mesmo fabricante. Salienta-se que o tempo de pressurização observado foi de 72,6 minutos e a tensão máxima calculada segundo a ASTM D 1599 (2005) foi de 44,36 MPa.

Por outro lado, no corpo-de-prova laminado submetido a temperatura ambiente (CPE1LAMB) a pressão máxima observada foi de 6,18 MPa indicando um desempenho termomecânico inferior aquele submetido a temperatura elevada. O baixo desempenho termomecânico do corpo-de-prova CPE1LAMB indica que o mesmo possuía algum tipo de falha no laminado, região onde ocorreu a ruptura. Contudo, verifica-se que o valor de pressão hidrostática observado é muito superior aos similares colados submetidos a temperatura elevada, por exemplo. Não foi possível se utilizar um espaço amostral maior devido à falta de corpos-de-prova laminados para tal.

Em suma, pode-se dizer que os produtos laminados do fabricante nacional possuem melhor desempenho termomecânico que os seus similares colados. Destaca-se que a tensão hidrostática máxima calculada segundo as recomendações da ASTM D 1599 (2005) foi de 30,70 MPa e o tempo de pressurização observado foi de 72,2 minutos. Ainda, cabe ressaltar que a região em que ocorreu o vazamento foi no laminado (Figura 91).

Tabela 33 – Pressão de máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova laminados.

CP	Pressão máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo de pressurização (min)	Ruptura
CPE1L85	8,93	44,36	72,6	laminado
CPE1LAMB	6,18	30,70	72,2	laminado

As Tabelas 34 e 35 apresentam a pressão e tensão máximas e o tempo de pressurização dos corpos-de-prova importados ensaiados a temperatura de 85°C e ambiente. No Apêndice IV são apresentadas curvas de desenvolvimento de pressão hidrostática nos corpos-de-prova ensaiados.

Nos corpos-de-prova submetidos a temperatura de 85°C salienta-se que o início da pressurização se deu entre 2 horas e 54 minutos e 3 horas de ensaio. Nestes pode-se observar da Tabela 34 que a pressão média máxima foi de 12,42 MPa, isto é, quase 4 vezes superior aos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C (Tabela 31), indicando assim a superioridade de desempenho termomecânico do adesivo importado sobre o nacional. O tempo de pressurização médio foi de 93,9 minutos, estando fora do intervalo utilizado pela ASTM D 1599 (2005). A tensão hidrostática média máxima obtida segundo as recomendações da ASTM D 1599 (2005) foi de 54,36 MPa.

Salienta-se que o único corpo-de-prova importado submetido a temperatura de 85°C que alcançou a ruptura foi o CPA1C85 com 11,07 MPa de pressão hidrostática e tempo de pressurização de 87,1 minutos, contudo esta não se deu no adesivo, ocorrendo por delaminação do flange (Figura 92). Nos corpos-de-prova que não atingiram a ruptura a pressão foi continuamente elevada até o limite do equipamento de ensaio.

Tabela 34 – Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	Pressão máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo de pressurização (min)	Ruptura
CPA1C85	11,07	48,96	87,1	flange
CPA2C85	13,11	57,15	92,3	não houve
CPA3C85	13,07	56,98	102,5	não houve
Média	12,42	54,36	93,5	Média
Desvio	1,17	4,68	7,8	Desvio

Com relação aos corpos-de-prova submetidos a temperatura ambiente (CPE1CAMB, CPE2CAMB e CPE3CAMB) durante todo o ensaio não houve qualquer indício de ruptura ou qualquer vazamento nas juntas avaliadas com a elevação contínua de pressão até o limite do equipamento. Da Tabela 35 a pressão média máxima obtida foi de 13,20 MPa e o tempo de pressurização foi de 89,0 minutos. A tensão máxima calculada segundo as recomendações da ASTM D 1599 (2005) foi de 57,56 MPa.

Tabela 35 – Pressão máxima, tensão máxima e tempo de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	Pressão máxima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo de pressurização (min)	Ruptura
CPA1CAMB	13,15	57,33	84,1	não houve
CPA2CAMB	13,14	57,29	87,5	não houve
CPA3CAMB	13,32	58,05	95,3	não houve
Média	13,20	57,56	89,0	Média
Desvio	0,10	0,43	5,7	Desvio

Em suma, destes resultados percebe-se que altas temperaturas não produzem efeitos deletérios no adesivo utilizado nos corpos-de-prova importados indicando o excelente desempenho termomecânico frente às condições de serviço em plataformas marítimas. Deve-se salientar que nas plataformas da Petrobras na Bacia de Campos todas as juntas coladas das tubulações do tipo 7000M provenientes do fabricante internacional somente são confeccionadas com adesivo tipo RP-60B segundo recomendações do fabricante. Desta forma, a utilização do adesivo tipo PSX-60 seria uma alternativa para contornar as falhas mecânicas que tem se evidenciado *in loco*.

Do ponto de vista dos ensaios de desempenho termomecânico, isto é, *DMTA*, temperatura de amolecimento de Vicat, e tração dos adesivos, foi verificada certa similaridade entre o adesivo importado (RP-60B) sobre o adesivo nacional, sendo que o primeiro apresentou uma leve superioridade. Nos ensaios hidrostáticos nota-se grande diferença entre o adesivo importado (PSX-60) e o nacional. Destes resultados, pode-se dizer que se o adesivo PSX-60 fosse caracterizado (*DMTA* e temperatura de amolecimento de Vicat) e ensaiado a tração, este provavelmente apresentaria desempenho termomecânico superior ao nacional e ao importado tipo RP-60B,

podendo-se supor ainda que se o adesivo importado RP-60B fosse utilizado nos ensaios hidrostáticos a diferença entre o nacional e o importado não seria tão marcante.

Com base nos resultados de caracterização de adesivos e tubos, nos ensaios de tração nos adesivos e nos ensaios hidrostáticos em corpos-de-prova de tubo e adesivo pode-se dizer que o desempenho termomecânico dos adesivos nacional e importado tipo RP-60B é insatisfatório para a temperatura de serviço das juntas coladas de tubulações de PRFV, prejudicando a funcionalidade do sistema.

3.3.4 Deslocamentos e deformações nas juntas dos corpos-de-prova

Outra alternativa de se avaliar o comportamento das juntas das tubulações de PRFV frente a aplicação de pressão e temperatura foi o monitoramento de deslocamento destas por meio de *LVDTs*. Destaca-se que no Apêndice V são apresentadas curvas de desenvolvimento de deslocamentos dos *LVDTs* localizados nas juntas dos corpos-de-prova ensaiados.

As Tabelas 36 a 39 apresentam os deslocamentos e deformações desenvolvidas nas juntas coladas dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C, no momento do equilíbrio de temperatura na face da luva, isto é, com 2 horas e 30 minutos de ensaio, além daqueles desenvolvidos no momento da ruptura.

Conforme se pode evidenciar nas Figuras no Apêndice IV, deve-se salientar que os *LVDTs* referentes às juntas coladas intermediárias (*LVDTs* 2 e 3) são de certa forma interdependentes, pois quando há mobilidade da luva para um sentido, por exemplo, para a direita, o *LVDT2* irá acusar deslocamento positivo e, por sua vez, o *LVDT3* irá acusar deslocamento negativo, pois estes encontram-se alinhados.

A determinação das deformações foi efetuada a partir do comprimento de colagem de 50 mm na luva e nos flanges (Tabelas 7, 8, 12 e 13). A partir das curvas obtidas nos ensaios de tração uniaxial de adesivos (Figura 97), pode-se supor que para as temperaturas de equilíbrio nestes, por meio de interpolação linear, as deformações de escoamento dos mesmos encontram nas Tabelas 37 e 39.

Da Tabela 36 nota-se que no momento da estabilização de temperatura, os maiores deslocamentos verificados nos corpos-de-prova foram de 0,148 mm, 0,140 mm, 0,216 mm e 0,242 mm, localizados nos *LVDTs* 2 e 4 respectivamente.

Observando as deformações calculadas (Tabela 37) para os valores de deslocamento, nota-se que a maior magnitude de deformação verificada foi de 0,484%, sendo este valor muito inferior àquele verificado como limite de escoamento, isto é, 0,88%. Considerando que não esteja ocorrendo falha de adesão, os adesivos estariam muito distantes do escoamento.

Destaca-se que no corpo-de-prova CPE1C85 por volta de 1 hora e 30 minutos de ensaio, os LVDTs intermediários (2 e 3) apresentaram uma elevação brusca de deslocamento, que pode indicar uma falha de aderência no adesivo. Contudo, não foi verificado qualquer tipo de vazamento nas juntas (Figura 137 no Apêndice V).

Tabela 36 – Deslocamentos monitorados nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1C85	0,122	0,148	0,015	0,121
CPE2C85	0,100	0,140	0,000	0,050
CPE3C85	0,134	0,146	0,094	0,216
CPE4C85	0,023	0,036	0,039	0,242

Tabela 37 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)	ϵ_{esc} (%)
CPE1C85	0,245	0,296	0,030	0,242	0,92
CPE2C85	0,199	0,280	0,000	0,101	0,90
CPE3C85	0,267	0,292	0,188	0,432	0,91
CPE4C85	0,046	0,072	0,078	0,484	0,88

De forma geral, no momento da pressurização todos os LVDTs indicaram aumento brusco de deslocamento, o que era esperado. Da Tabela 38 nota-se que as maiores magnitudes de deslocamento observadas estiveram localizadas nas juntas intermediárias (LVDT2 e LVDT3), indicando que ocorreria a ruptura nestes pontos. Da Tabela 39, verifica-se que na ruptura dos corpos-de-prova, as deformações calculadas a partir dos valores de deslocamentos indicaram que as juntas quase em sua totalidade alcançaram o escoamento do adesivo, logicamente caso não tenha ocorrido falha de adesão destes.

Deve-se salientar ainda que na segunda etapa de pressurização do corpo-de-prova CPE3C85 todas as juntas já indicavam escoamento dos adesivos mesmo antes

de apresentar qualquer vazamento ou queda de pressão (Tabela 39 e Figura 139). Dos valores apresentados referentes ao corpo-de-prova CPE4C85, supõe-se que em algum momento houve falha de adesão devido as deformações excessivas nas juntas, principalmente as intermediárias, onde ficou evidenciada a ruptura.

Tabela 38 – Deslocamentos monitorados nas juntas no momento da ruptura nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1C85	0,379	0,496	0,600	0,284
CPE2C85	0,522	0,678	0,492	0,384
CPE3C85	0,810	1,166	0,593	0,746
CPE4C85	0,187	2,320	3,000	0,606

Tabela 39 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas no momento da ruptura nos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)	ϵ_{esc} (%)
CPE1C85	0,758	0,992	1,200	0,568	0,89
CPE2C85	1,045	1,356	0,984	0,767	0,86
CPE3C85	1,619	2,332	1,186	1,491	0,66
CPE4C85	0,374	4,640	6,000	1,212	0,81

Com relação aos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente, as Tabelas 40 e 41 apresentam os deslocamentos desenvolvidos e as deformações calculadas na etapa 2 de pressurização. As Tabelas 42 e 43 apresentam o mesmo na ruptura dos corpos-de-prova.

Da Tabela 40 observa-se que as maiores magnitudes de deslocamento ocorreram nas juntas extremas (LVDTs 1 e 4). Voltando aos ensaios hidrostáticos nos corpos-de-prova submetidos a temperatura de 85°C, salienta-se que os níveis de deslocamento à temperatura ambiente são muito inferiores que aqueles, inclusive no momento da pressurização (Apêndice V).

Por exemplo, o corpo-de-prova CPE3C85 apresentou deslocamento na segunda etapa de pressurização da ordem de 0,70 mm. No que tange as deformações nos corpos-de-prova (Tabela 41) observa-se que nesta etapa de pressurização os adesivos das juntas não alcançaram o escoamento.

Tabela 40 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1CAMB	0,045	0,048	-0,006	0,095
CPE2CAMB	0,085	0,008	-0,001	0,118
CPE3CAMB	0,061	0,002	0,006	0,114

Tabela 41 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)	ϵ_{esc} (%)
CPE1CAMB	0,090	0,096	-0,012	0,190	0,29
CPE2CAMB	0,170	0,016	-0,002	0,236	0,28
CPE3CAMB	0,122	0,004	0,012	0,229	0,28

Das Tabelas 42 e 43 verifica-se que as maiores magnitudes de deslocamentos e deformações ocorreram nas juntas extremas, contudo, as rupturas ocorreram nas juntas intermediárias (LVDTs 2 e 3). Deve-se destacar a diferença entre a distribuição tensional nas juntas extremas e as juntas intermediárias. Por ser uma distribuição hidrostática, além da componente radial, existe a componente axial com grande influência das tampas cegas de aço nas extremidades no caso das juntas extremas por ser uma região concentradora de tensões. Por outro lado, a componente axial nas juntas tubo-luva (LVDTs 2 e 3) não tiveram grande influência, conforme observado desde o início da pressurização. Esta contribuição da tensão axial na elevação do deslocamento da juntas flange-tubo ficou mais evidente nos ensaios a temperatura ambiente.

Tabela 42 – Deslocamentos monitorados nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1CAMB	0,172	0,158	0,003	0,291
CPE2CAMB	0,208	0,086	0,005	0,248
CPE3CAMB	0,168	0,180	0,006	0,231

Tabela 43 – Deformações calculadas e de escoamento (ϵ_{esc}) nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)	ϵ_{esc} (%)
CPE1CAMB	0,344	0,316	0,006	0,582	0,29
CPE2CAMB	0,416	0,172	0,010	0,497	0,28
CPE3CAMB	0,337	0,360	0,012	0,462	0,28

No que tange as juntas laminadas do fornecedor nacional, da Tabela 44, nota-se que antes da pressurização, as juntas extremas (LVDTs 1 e 4) do corpo-de-prova submetido a temperatura de 85°C apresentaram deformações entre 0,20 mm e 0,30 mm. Por outro lado, as juntas intermediárias (LVDTs 2 e 3) os deslocamentos foram desprezíveis, onde o maior valor absoluto encontrado foi na junta 3, sendo que o sinal negativo indica que houve encurtamento na parte inferior do corpo-de-prova. Destaca-se que no corpo-de-prova submetido a temperatura ambiente ficaram evidenciados deslocamentos desprezíveis antes da pressurização.

Com a pressurização (Tabela 45), especificamente na segunda etapa, foram observados deslocamentos máximos da ordem de 0,40 mm do corpo-de-prova CPE1L85. Por outro lado o corpo-de-prova submetido a temperatura ambiente apresentou deslocamento máximo de 0,07 mm no mesmo LVDT. Na ruptura dos corpos-de-prova (Tabela 46) o maior deslocamento verificado foi de aproximadamente 0,66 mm no corpo-de-prova submetido a temperatura de 85°C (CPE1L85) contra 0,17 mm no similar submetido a temperatura ambiente (CPE1LAMB). Todavia, deve-se destacar que as juntas extremas (LVDTs 1 e 4) eram monolíticas, assim, mesmo sendo regiões com maiores deslocamentos verificados, a região de maior probabilidade de ruptura seria a junta intermediária (LVDTs 2 e 3) por ser esta laminada com um deslocamento máximo observado de quase 0,20 mm no corpo-de-prova aquecido.

Tabela 44 – Máximos deslocamentos nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova nacionais laminados.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1L85	0,193	0,054	-0,093	0,299
CPE1LAMB	0,003	0,000	0,001	0,006

Tabela 45 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização dos corpos-de-prova nacionais laminados.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1L85	0,255	0,048	-0,114	0,424
CPE1LAMB	0,027	0,002	0,004	0,072

Tabela 46 – Deslocamentos monitorados nas juntas na ruptura dos corpos-de-prova nacionais laminados.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPE1L85	0,457	0,070	-0,168	0,663
CPE1LAMB	0,072	0,002	0,004	0,162

Em relação aos corpos-de-prova importados colados, as Tabelas 47 e 48 apresentam os deslocamentos e as deformações desenvolvidas nas juntas daqueles submetidos a temperatura de 85°C com 2 horas e 30 minutos de ensaio. Verifica-se que os deslocamentos máximos foram entre 0,10 mm (0,206%) e 0,13 mm (0,263%) na junta extrema à direita (LVDT4).

Com a pressurização dos corpos-de-prova (Tabelas 49 e 50), nota-se que os deslocamentos elevaram-se de 0,13 mm (0,263%) para 0,18 mm (0,362%), mantendo-se o LVDT4 como aquele que apresentou maior nível de deformação, indicando que se os corpos-de-prova viessem a romper, isto ocorreria nesta região.

Tabela 47 – Deslocamentos monitorados nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1C85	0,032	0,052	0,023	0,112
CPA2C85	0,032	0,024	0,043	0,132
CPA3C85	-0,031	0,038	-0,012	0,103

Tabela 48 – Deformações calculadas nas juntas com 2 horas e 30 minutos de ensaio dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)
CPA1C85	0,064	0,104	0,046	0,223
CPA2C85	0,063	0,048	0,086	0,263
CPA3C85	-0,062	0,076	-0,024	0,206

Tabela 49 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1C85	0,080	0,092	0,030	0,169
CPA2C85	0,071	0,072	0,056	0,181
CPA3C85	0,014	0,042	0,044	0,174

Tabela 50 – Deformações calculadas nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)
CPA1C85	0,160	0,184	0,060	0,338
CPA2C85	0,142	0,144	0,112	0,362
CPA3C85	0,029	0,084	0,088	0,347

Ao final do ensaio (Tabelas 51 e 52), os corpos-de-prova que não romperam, ou seja, CPA2C85 e CPA3C85 atingiram uma deformação máxima de 0,72%. Por outro

lado, o corpo-de-prova CPA1C85 indicou uma deformação de ruptura da ordem de 4,7% (Tabela 52) e, conforme já explanado anteriormente, a falha que ocorreu neste corpo-de-prova foi por delaminação do flange (Figura 92).

Tabela 51 – Deslocamentos monitorados nas juntas ao final dos ensaios dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1C85	0,458	0,202	0,142	2,362
CPA2C85	0,190	0,162	0,175	0,363
CPA3C85	0,145	0,042	0,177	0,330

Tabela 52 – Deformações calculadas nas juntas ao final dos ensaios dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura de 85°C.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)
CPA1C85	0,917	0,404	0,284	4,725
CPA2C85	0,380	0,324	0,350	0,726
CPA3C85	0,290	0,084	0,354	0,659

Em todos os corpos-de-prova importados não se pode dizer em qual momento as juntas atingiram o escoamento, pois o adesivo utilizado não foi submetido aos ensaios de tração uniaxial, contudo, fazendo-se um paralelo com o adesivo do mesmo fabricante que foi caracterizado (RP-60B), utilizando a Figura 75 tem-se que para a temperatura média que os mesmos atingiram nos ensaios (42,7°C a 51,7°C) a deformação de escoamento estaria entre 0,38% e 0,43%. No entanto, devido ao elevado desempenho das juntas coladas destes corpos-de-prova com a aplicação de temperatura e ao baixo desempenho do adesivo caracterizado a temperaturas da ordem de 55°C pode-se afirmar que os dois adesivos têm comportamentos distintos no que tange ao desempenho termomecânico com destacável superioridade do adesivo PSX-60, indicando ainda que este último apresente limite de escoamento muito superior ao tipo RP-60B.

Comparando-se os deslocamentos desenvolvidos nos corpos-de-prova importados (Tabelas 47 a 52) com seus similares nacionais (Tabelas 36 a 39) frente a aplicação de pressão e temperatura, verifica-se que praticamente em todos os LVDTs as magnitudes de deslocamento destes últimos são bem superiores aos primeiros indicando que o produto nacional, conforme já observado nos ensaios de tração uniaxial de adesivos, possuem baixo desempenho termomecânico, indicando maior probabilidade de deformações excessivas que podem levar ao colapso da estrutura.

Com relação aos corpos-de-prova importados colados submetidos a temperatura ambiente, das Tabelas 53 e 54 verifica-se que antes da pressurização todos os corpos-de-prova apresentaram níveis de deslocamento e deformação desprezíveis.

Tabela 53 – Deslocamentos monitorados nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1CAMB	0,000	0,002	0,004	0,004
CPA2CAMB	0,007	0,000	0,006	0,014
CPA3CAMB	0,001	0,000	0,001	0,002

Tabela 54 – Deformações calculadas nas juntas antes da pressurização dos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)
CPA1CAMB	0,001	0,004	0,008	0,008
CPA2CAMB	0,014	0,000	0,012	0,028
CPA3CAMB	0,002	0,000	0,002	0,005

No momento da pressurização (Tabelas 55 e 56), mais precisamente na segunda etapa o maior deslocamento em módulo verificado foi de 0,05 mm, e nota-se ainda uma tendência que foi seguida em todos os corpos-de-prova, isto é, as juntas extremas (LVDTs 1 e 4) foram aquelas que deformaram mais, exceto o corpo-de-prova CPA1CAMB (LVDT2). Na última etapa de pressurização (Tabelas 57 e 58) a tendência citada seguiu-se, contudo uma elevação de deformação, chegando-se a um máximo de aproximadamente 0,297 mm. No que tange a deformação calculada pode-se dizer que se não houve falha de aderência, a máxima deformação verificada foi de 0,60%. Comparando-se os deslocamentos nas juntas coladas submetidas a temperatura ambiente com aquelas submetidas a temperatura de 85°C tem-se que as magnitudes nos diferentes pontos avaliados não foram muito distintas, exceto naquele corpo-de-prova que sofreu ruptura (CPA1C85, Tabela 52). Portanto, a temperatura de 85°C não produziu efeito deletério nas juntas coladas do produto importado.

Tabela 55 – Deslocamentos monitorados nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1CAMB	-0,052	0,012	0,012	0,046
CPA2CAMB	0,002	0,009	0,009	0,059
CPA3CAMB	0,002	0,003	0,003	0,036

Tabela 56 – Deformações calculadas nas juntas na etapa 2 de pressurização nos corpos-de-prova colados importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (%)	LVDT2 (%)	LVDT3 (%)	LVDT4 (%)
CPA1CAMB	0,066	-0,104	0,024	0,091
CPA2CAMB	0,063	0,004	0,018	0,118
CPA3CAMB	0,058	0,004	0,006	0,073

Tabela 57 – Deslocamentos monitorados nas juntas ao final dos ensaios nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1CAMB	0,160	0,022	0,097	0,238
CPA2CAMB	0,204	0,108	0,051	0,297
CPA3CAMB	0,174	0,142	0,273	0,252

Tabela 58 – Deformações calculadas nas juntas ao final dos ensaios nos corpos-de-prova importados submetidos a temperatura ambiente.

CP	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)
CPA1CAMB	0,319	0,044	0,194	0,477
CPA2CAMB	0,408	0,216	0,102	0,594
CPA3CAMB	0,348	0,284	0,546	0,505

3.3.5 Superfície de ruptura dos corpos-de-prova

As Figuras a seguir apresentam as superfícies de ruptura dos corpos-de-prova ensaiados. A Figura 83 apresenta o momento da ruptura do corpo-de-prova CPE1C85, que ocorreu com um vazamento na interface luva e tubo onde estava localizado o LVDT3, ou seja, àquele que apresentou maior deformação no adesivo.

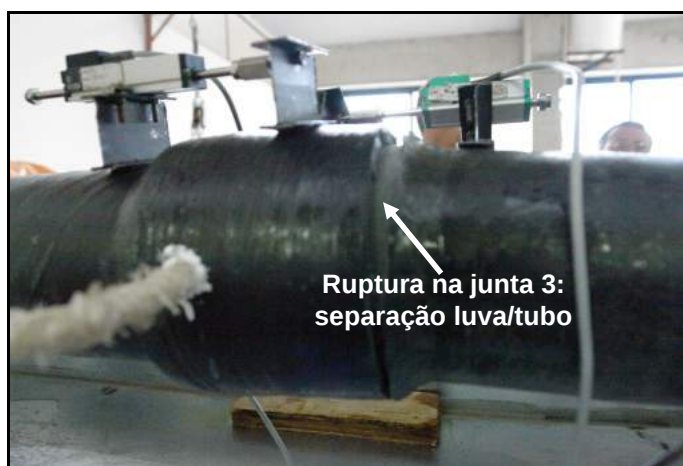


Figura 83 – Ruptura do corpo-de-prova CPE1C85.

As Figuras 84 a 86 apresentam as superfícies de ruptura da luva e do tubo, que para facilitar a visualização destas os mesmos foram seccionados ao longo do comprimento do corpo de prova. Da Figura 84 verifica-se que a ruptura nesta junta se deu por falha de aderência e cisalhamento do adesivo com alguma delaminação da luva. O cisalhamento do adesivo ocorreu em conjunto com a delaminação da luva, sendo isto notado pela presença de estrias na superfície onde ocorreu o cisalhamento (Figura 84) além da presença de parte da luva aderida ao tubo.

Das Figuras 85 e 86 pode-se visualizar que a maior parte do adesivo ficou aderida ao tubo. A ruptura por falha de aderência pode ser melhor verificada na Figura 84 e 85, caracterizada pela ausência de estrias e pela presença de superfície com ausência de rugosidade. Das Figuras 85 e 86 percebe-se a presença também de vazios de colagem. Conforme Knox *et al.* (2001), a presença de vazios na borda da junta (zona 1, Figuras 14, 15 e 16) produz maior concentração de tensão.



Figura 84 – Superfície de ruptura do corpo-de-prova CPE1C85.



Figura 85 – Superfície de ruptura da luva do corpo-de-prova CPE1C85.



Figura 86 – Superfície de ruptura da luva do corpo-de-prova CPE1C85.

A Figura 87 apresenta as duas metades seccionadas da região onde ocorreu a ruptura no corpo-de-prova CPE2C85. Da Figura 88 verifica-se a presença de vazios com arestas aciculares na junta fraturada. Estes tipos de vazios são propagadores de fissura por concentrarem tensões nestas arestas. Desta forma, a existência de vazios desta grandeza induz a uma junta de baixa capacidade mecânica, pois a confiabilidade de uma junta colada é função primordial da presença de defeitos na área colada (Berry e d'Almeida, 2000). Ainda, por meio de simulação numérica e experimental Knox *et al.*

(2001) verificaram que o efeito combinado de defeitos e temperatura da ordem de 90°C produz deflexão na junta, sobretudo sob longo período de simulação (Figura 17). Assim, se uma junta colada com presença de defeitos com arestas aciculares for submetida a temperatura elevada, a possibilidade de colapso da estrutura é factual.

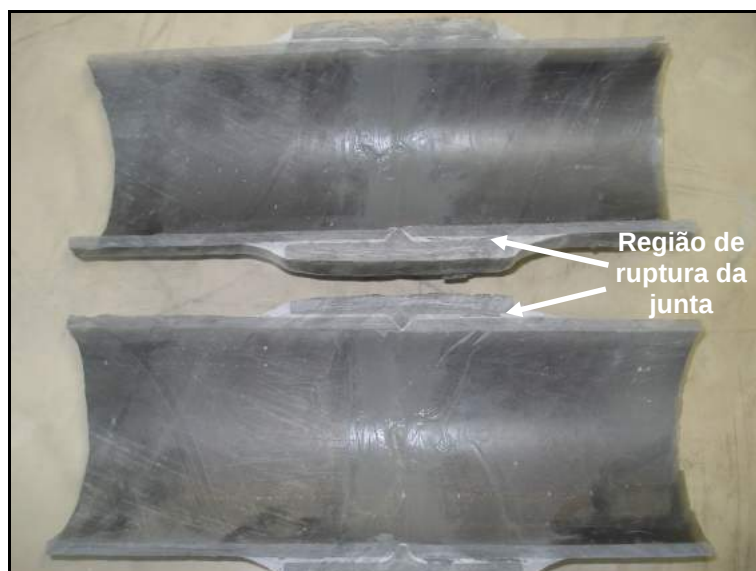


Figura 87 – Região de ruptura do corpo-de-prova CPE2C85.

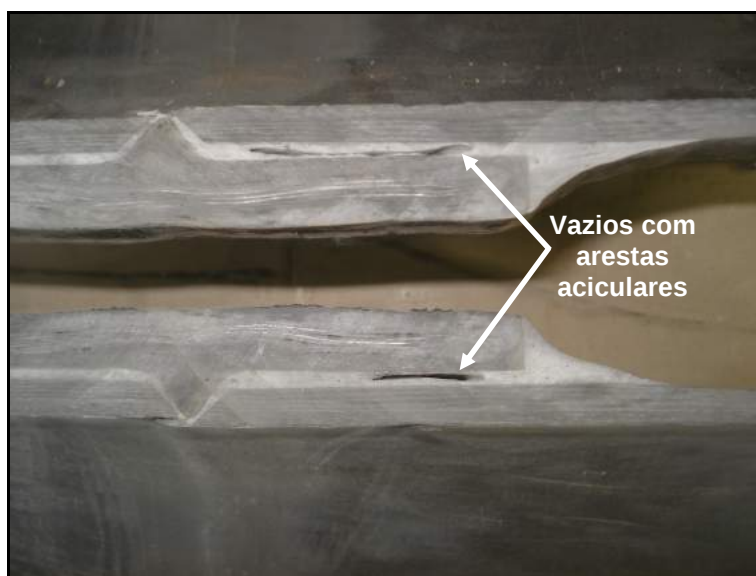


Figura 88 – Presença de vazios na região fraturada do corpo-de-prova CPE2C85.

Assim como o corpo-de-prova CPE2C85, a Figura 89 apresenta as duas metades seccionadas da região onde ocorreu a ruptura no CPE3C85. Da Figura 90 nota-se que diferentemente do corpo-de-prova CPE2C85, na região fraturada do corpo-de-prova CPE3C85 a ausência de vazios. Desta forma a fissura inicial teve de percorrer um caminho maior até que houvesse algum vazamento na junta, isto pode ser evidenciado pela maior magnitude de pressão hidrostática de ruptura deste corpo-de-prova em oposição ao CPE2C85 (Tabela 31).



Figura 89 – Região de ruptura do corpo-de-prova CPE3C85.



Figura 90 – Caminho de fissuração na região fraturada do corpo-de-prova CPE3C85.

Com relação ao corpo-de-prova laminado submetido a temperatura de 85°C (CPE1L85) a Figura 91 apresenta a região a qual ocorreu a ruptura com vazamento no laminado. Por outro lado, a Figura 92 apresenta o único corpo-de-prova importado (CPA1C85) que alcançou a ruptura, contudo, esta não se deu no adesivo, ocorrendo por delaminação do flange (Tabelas 34, 51 e 52).



Figura 91 – Vazamento no laminado do corpo-de-prova CPE1L85.



Figura 92 – Delaminação do flange no corpo-de-prova CPA1C85.

4. Conclusões

Da identificação química dos materiais (*FTIR* e *TGA*) pode-se dizer que as resinas de ambos os fabricantes são epóxis tipo bisfenol A com alguma carga inorgânica. Em relação aos catalisadores, o nacional trata-se de um composto a base de amido-amina e o importado uma ciclohexilamina, sendo ambos com algum teor de inorgânicos, sobretudo o nacional. Em relação aos tubos, ambos os produtos são a base de epóxi diferindo apenas no catalisador, sendo que o nacional foi curado com amido-amina ou amino-éter e o importado foi curado com epicloridrina ou melamínica 1:1, ressaltando que ambos apresentam considerável teor de inorgânicos (nacional de 37,58% e importado de 82,81%).

Das análises de degradação térmica (*TGA*, *DMTA* e temperatura de amolecimento de Vicat) verificou-se que os adesivos apresentam desempenho satisfatório a temperatura ambiente, todavia, a temperatura da ordem de 55°C o desempenho mecânico cai bruscamente, sendo isto confirmado nos ensaios de tração uniaxial de adesivos.

Dos ensaios hidrostáticos foi verificado que o equipamento desenvolvido simulou com grande eficácia as condições encontradas *in loco*, pressão e elevadas temperaturas (85°C), das juntas coladas de tubulações de PRFV. Pode-se ainda estender a aplicabilidade deste equipamento a outros tipos de juntas, como foi o caso das juntas laminadas avaliadas.

No que tange ao comportamento das juntas coladas frente às temperaturas elevadas, tem-se que a integridade mecânica (pressão de ruptura) do produto nacional reduz-se significativamente e, nos casos em que haja além de temperaturas elevadas a presença de falhas de colagem (vazios aciculares, por exemplo), isto torna-se mais crítico. Ressalta-se que na maioria dos ensaios a ruptura ocorreu nos adesivos, ou por falha de adesão ou por cisalhamento, indicando que os tubos suportam as elevadas temperaturas, conforme observado nas análises de *DMTA*.

Por outro lado, o produto importado apresentou excelente desempenho termomecânico, muito superior às juntas laminadas e coladas do fornecedor nacional. Isto foi devido ao adesivo utilizado ser diferente do caracterizado (RP-60B), isto é, do tipo PSX-60, pois de todos os corpos-de-prova importados ensaiados, o único que

apresentou ruptura foi por delaminação do flange. Contudo, deve-se salientar que nas plataformas marítimas da Petrobras na Bacia de Campos todas as juntas coladas com tubulações do tipo 7000M do fabricante internacional somente são utilizados adesivos do tipo RP-60B, segundo recomendações do próprio fabricante. Desta forma, a utilização do adesivo do tipo PSX-60 seria uma alternativa para contornar as falhas mecânicas verificadas *in loco*.

Cabe ainda destacar que utilizar somente pressão como parâmetro nos ensaios hidrostáticos é muitas vezes ineficiente, pois por meio de medições de deslocamentos das juntas coladas pode-se perceber que as deformações destas são elevadas, principalmente no produto nacional submetido a temperaturas da ordem de 85°C. Desta forma, mesmo que a junta não venha a sofrer vazamento, o adesivo desta pode alcançar o regime plástico e a probabilidade de colapso da estrutura torna-se elevada.

Com relação à temperatura de ensaio, os efeitos deletérios nas juntas coladas do produto nacional foram elevados mesmo com o adesivo sob temperatura inferior a 85°C (por volta de 65°C), diferentemente do produto importado, máximo de 57°C. Deve-se destacar que a utilização da ASTM D 1599 (2005) para qualificar juntas coladas para aplicação no Brasil não é eficaz, visto que estas tubulações trabalham a temperaturas elevadas e a referida norma não considera este parâmetro.

Salienta-se ainda que para a qualificação de adesivos desenvolvidos para serem aplicados em ambientes de temperatura elevada, uma análise preliminar pode ser efetuada por meio de ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura, visto que trata-se de um procedimento não muito oneroso. Caso o adesivo apresente desempenho satisfatório nos ensaios trativos, procede-se a qualificação das juntas coladas propriamente dita por meio dos ensaios hidrostáticos em corpos-de-prova padronizados. Deve-se deixar claro que em momento algum os ensaios trativos substituem os ensaios hidrostáticos, pois estes últimos simulam as condições encontradas *in loco*. Desta forma, os fabricantes deste material teriam um produto mais seguro aos atualmente utilizados. Ressalta-se, também, a importância da indústria nacional neste contexto, a fim de se qualificar seus produtos sob condições mais severas de serviço. Finalmente, este trabalho apresenta um novo critério de qualificação de juntas coladas, contemplando as condições de serviço, além dos testes de estanqueidade já normalizados.

5. Sugestões para trabalhos

- Avaliação de diferentes adesivos por meio de ensaios de tração uniaxial e de juntas coladas com estes adesivos por meio de ensaios hidrostáticos com variação de temperatura.
- Estudo do comportamento de diversos tipos de juntas (coladas, laminadas e mecânicas) variando-se diâmetro e pressão de serviço dos corpos-de-prova.
- Estudar a possibilidade de se utilizar algum tipo de aquecimento externo devido a ausência de circulação de água quente na pressurização dos corpos-de-prova nos ensaios hidrostáticos.
- Adição de atenuadores mecânicos nas juntas coladas para verificar o acoplamento de efeitos de fadiga mecânica com pressão e elevadas temperaturas.
- Verificar o efeito de fadiga térmica com a injeção contínua de ciclos de água fria e água quente no sistema e posterior aplicação de pressão.
- Utilizar placa de aquisição de dados com número maior de canais aumentando-se o número de parâmetros monitorados.
- Utilizar dois *LVDTs* diametralmente opostos em cada junta monitorada nos ensaios hidrostáticos a fim de se evitar a possibilidade de distorção em alguma junta, visto que não existe certeza de simetria de deformação nestas.
- Simulação numérica em juntas coladas de tubulações de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV) considerando temperatura como variável principal.
- Desenvolver uma metodologia de ensaio hidrostático considerando os parâmetros mais importantes (pressão, temperatura e deformações) para a qualificação destes materiais e posterior adequação das normas às situações mais críticas.

6. Referências bibliográficas

- Aerocon System Company (2006) *Miscellaneous – Fiberglass tow*, http://www.aeroconsystems.com/misc/fiber_tow.htm em 19/05/06, página mantida pela Aerocon System Company.
- Almeida, S. P. S. (2004) *Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Rio de Janeiro-RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, 87p.
- Alonso, M. V., Auad, M. L., Nutt, S. (2006) *Short-fiber-reinforced epoxy foams*. Composites: Part A, Vol. 37, p.1952-1960.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 638 (2003) *Standard test method for tensile properties of plastics*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 1525 (2006) *Standard test method for Vicat softening temperature of plastics*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 1598 (2002) *Standard test method for time-to-failure of plastic pipe under constant internal pressure*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 1599 (2005) *Standard test method for resistance to short-time hydraulic pressure of plastic pipe, tubing, and fittings*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 2105 (2001) *Standard test method for longitudinal tensile properties of fiberglass (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and tube*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 2290 (2004) *Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe by split disk method*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 2925 (2001) *Standard test method for Beam Deflection of Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe Under Full Bore Flow*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 2992 (2001) *Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for fiberglass (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings*.

- American Society for Testing and Materials – ASTM D 2996 (2001) *Standard specification for filament-wound fiberglass (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 4024 (2005) *Standard specification for machine made fiberglass (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) flanges*.
- American Society for Testing and Materials – ASTM D 5685 (2005) *Standard specification for fiberglass (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pressure pipe fittings*.
- Ameron International (2006), *Catálogos do fabricante*, www.ameron.com em 24/05/06, página mantida pela Ameron International.
- Berry, N. G. e d'Almeida, J. R. M. (2000) *Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas de carbono-epóxi*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. V. 10, N.º 3, p. 138-148.
- Brum, M. C. (2002) *Metodologia de colagem com avaliação do comportamento de adesivos por meio de testes de tração*. Dissertação de mestrado – UFRJ/EQ, Rio de Janeiro-RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 52p.
- Callister, W. D. (2000) *Ciência e engenharia de materiais – uma introdução*. 5ª Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro – RJ, 589p.
- Chawla, K. K. (1987) *Composite materials: science and engineering*. 1ª Ed., Springer-Verlag Ed. – New York Inc, 292p.
- Chawla, K. K. (1998) *Composite materials: science and engineering*. 2ª ed. Springer-Verlag Ed. – New York Inc, 503p.
- Cunha, J. A. P., Costa, M. L., Rezende, M. C. (2006) *Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência a tração de compósitos de fibra de carbono/Epóxi modificada*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. V. 16, N.º 3, p. 193-201.
- Delor-Jestin, F., Drouin, D., Cheval, P.-Y., Lacoste, J. (2006) *Thermal and photochemical ageing of epoxy resin – Influence of curing agents*. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, p.1247-1255.
- Dresher, W.H. (1969) *J. Metals*, Vol. 21, p. 17. (apud Chawla, 1998)
- Drinkwater, B. (1998) *Sounding out good adhesion*. *Materials World March*. p. 149–51 (apud Knox et al., 2001).

- Edra do Brasil (2006a) *Catálogos do fabricante*, www.edra.com.br em 24/05/06, página mantida pela Edra do Brasil.
- Edra do Brasil (2006b) *Databook Edra - Flutrol*, Flutrol Solução em alta tecnologia, Processo 4268-DB.
- Farias, O. L. e Balbi, D. (2004). *Eventos ocorridos com materiais de PRFV em plataformas da UN-BC*. Palestra proferida no 1.º Workshop da UN-RIO sobre PRFV. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, novembro de 2004.
- Fibertex (2006) *Fiberglass Suppliers of América*, Fibertex Product, <http://gssfiberglass2.iconnetwork.com/merchant.xhtml?id=9&step=2> em 19/05/06, página mantida pela Gss FiberGlass2.
- Gibson, A. G. (2003) *The cost effective use of fibre reinforced composites offshore*. University of Newcastle Upon Tyne, Health and Safety Executive (HSE) – Newcastle – United Kingdom, 133p.
- Higgins, R. A. (1982) *Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia*. Ed. Difel, 471p.
- Knox, E. M., Lafferty, S., Cowling, M. J and Hashim, S. A. (2001) *Design guidance and structural integrity of bonded connections in GRE pipes*. Composites Part A: applied science and manufacturing. V. 32, p. 231-241.
- Laney, P. (2002) *Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory – Idaho Falls, Idaho. 69p.
- Laza, J. M., Julian, C. A., Larrauri, E., Rodriguez, M., Leon, L. M. (1998) *Thermal scanning rheometer analysis of curing kinetic of an epoxy resin: 2. An amine as curing agent*. Polymer, Vol. 40, p.35-45.
- Liu, W., Varley, R. J., Simon, G. P. (2007) *Understanding the decomposition and fire performance processes in phosphorus and nanomodified high performance epoxy resins and composites*. Polymer, V. 48, p. 2345-2354.
- Lucas, E. F., Soares, B. G., Monteiro E. (2001) *Caracterização de polímeros – determinação de peso molecular e análise térmica*. E-papers Serviços Editoriais – Rio de Janeiro-RJ, 366p.
- Mano, E. B. (1991) *Polímeros como materiais de engenharia*. Ed. Edgard Blücher Ltda – São Paulo-SP, 218p.

- Middleton, V., Smith, G. M. (1996) *Non-destructive techniques for the evaluation of composites in offshore structures*. The Cost Effective Use of Fibre Reinforced Composites Offshore. Phase III, Marineteck Research, p. 815–52 (*apud* Knox et al., 2001).
- Mruk, S. A. (2004) *Plastics Piping. Standard Handbook of Plant Engineering*. McGraw-Hill, Chapter 5.14.
- Paiva, J. M. F., Mayer, S., Cândido, G. M., Rezende, M. C. (2006) *Avaliação da temperatura de transição vítrea de compósitos poliméricos reparados de uso aeronáutico*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 16, n.º 1, p. 79-87.
- Pilkey, W. D., Peterson, J. E., Clark, K. M. (1997) *Peterson's stress concentration factors*. 2nd Edition, John Willey & Sons, 576p.
- Pires, G.; Pereira, D. S.; Dias Filho, N. L.; Vecchia, G. D. (2005) *Caracterização físico-química do sistema éster de silsexquioxano / resina epóxi DGEBA / dietilenotriamina*. *Revista Matéria*, Vol. 20, nº 2 p.317-330.
- Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (2001) *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – principles, techniques, and applications*. Building Materials Series, 964p.
- Rotheiser, J. I. (2004) *Design of plastic products. Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill, Chapter 8.
- Sánchez-Soto, M., Pagés, P., Lacorte, T., Briceño, K., Carrasco, F. (2007) *Curing FTIR study and mechanical characterization of glass bead filled trifunctional epoxy composites*. *Composites Science and Technology*, 67, p. 1974-1985.
- Sada, A. E. e Corte, J. S. (2004) *Experiência da UN-RIO com tubulações em FRP*. Palestra proferida no 1.º Workshop da UN-RIO sobre PRFV. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, novembro de 2004.
- Saint Gobain (2006) *Reforços América Latina – Informações – Filamentos de Vidro*, <http://www.saint-gobain-vetrotex.com.br/portugues/gstrand.html> em 19/05/06, página mantida pela Saint-Gobain Vidros S.A.
- Salibi, Z. (2001) *Performance of reinforced thermosetting resin pipe systems in desalination applications: a long-term solution to corrosion – The Arabian Gulf example*. *Desalination*. V. 138, p.379-384.
- Sensoray Models 618/619 (1999) *PCI Smart A/D Cards*. Specifications. p.20.

- Stariz Corporation (2006) *Fiberglass*, <http://www.stariz.co.kr/material.htm> em 19/05/06, página mantida pela Stariz Corporation.
- The Norwegian Oil Industry Association (1997) *Recommended guidelines for NDT of GRP pipe systems and tanks*, 88p.
- Wahab, M. A., Alam, M. S., Pang, S. S., Peck, J. A., Jones, R. A. (2006) *Stress analysis of non-conventional composite pipes*. Composite Structures. Elsevier, pp. 1-8.
- Wright, R. E. (2004) *Thermosets, reinforced plastics, and composites. Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill, 88p.

Apêndice I – Ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura nos adesivos

Neste Apêndice são apresentadas as curvas tensão-deformação dos ensaios de tração uniaxial com variação de temperatura em adesivos nacional e importado. Da mesma forma é apresentado um resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios.

A fim de se facilitar o entendimento, nas Tabelas a seguir, para cada temperatura estudada, dos parâmetros medidos, isto é, tensão de escoamento (σ_{esc}), tensão de ruptura (σ_{rup}), deformação de escoamento (ϵ_{esc}), deformação de ruptura (ϵ_{rup}) e módulo de elasticidade (E) tem-se:

- mínimo e máximo referem-se, respectivamente, ao menor e ao maior valor em magnitude dos parâmetros obtidos para as amostras em questão;
- média, s e CV referem-se, respectivamente, a média estatística, ao desvio-padrão e ao coeficiente de variação dos parâmetros obtidos para as amostras em questão;
- LI e LS referem-se, respectivamente, ao limite inferior e ao limite superior dos parâmetros obtidos para as amostras em questão, ou seja, média subtraída do desvio-padrão e média adicionada ao desvio-padrão.

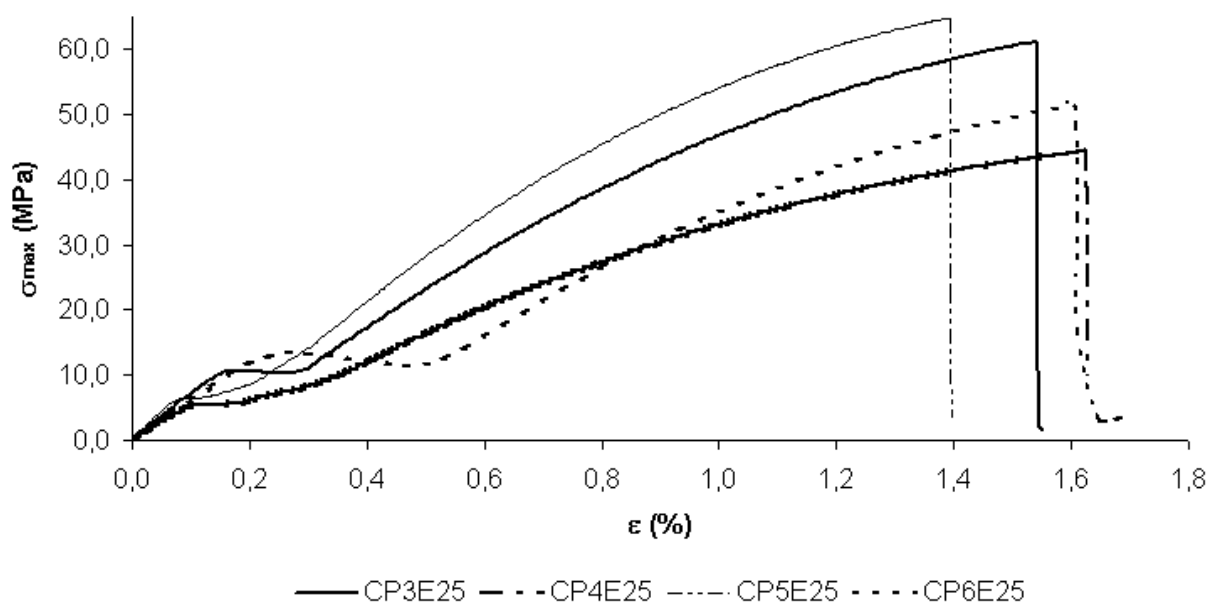


Figura 93 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 25°C.

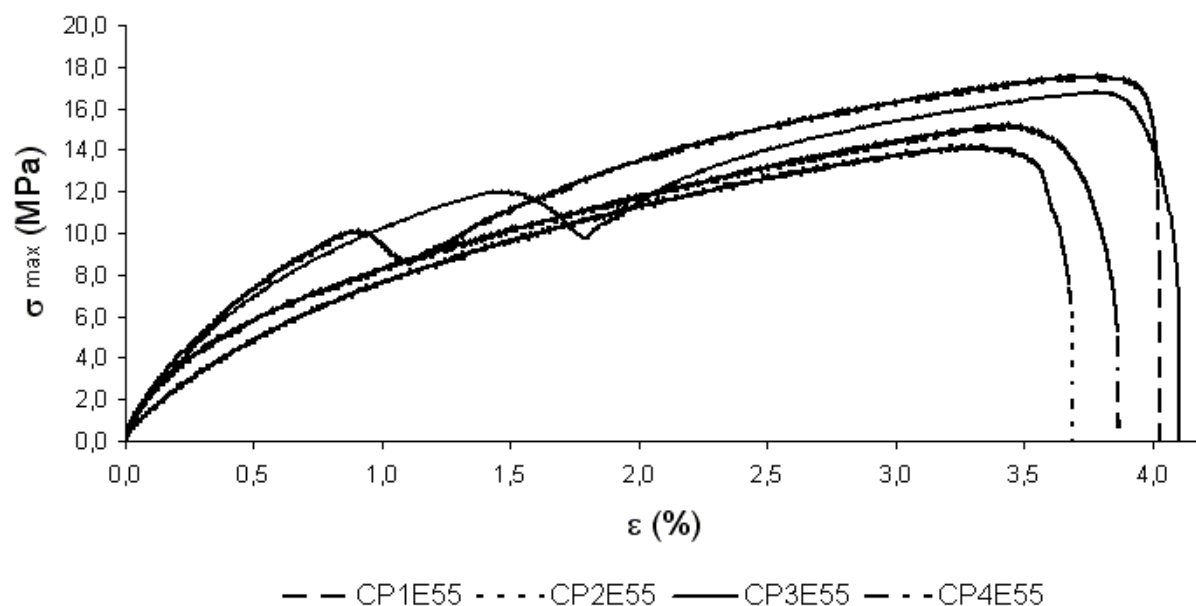


Figura 94 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 55°C.

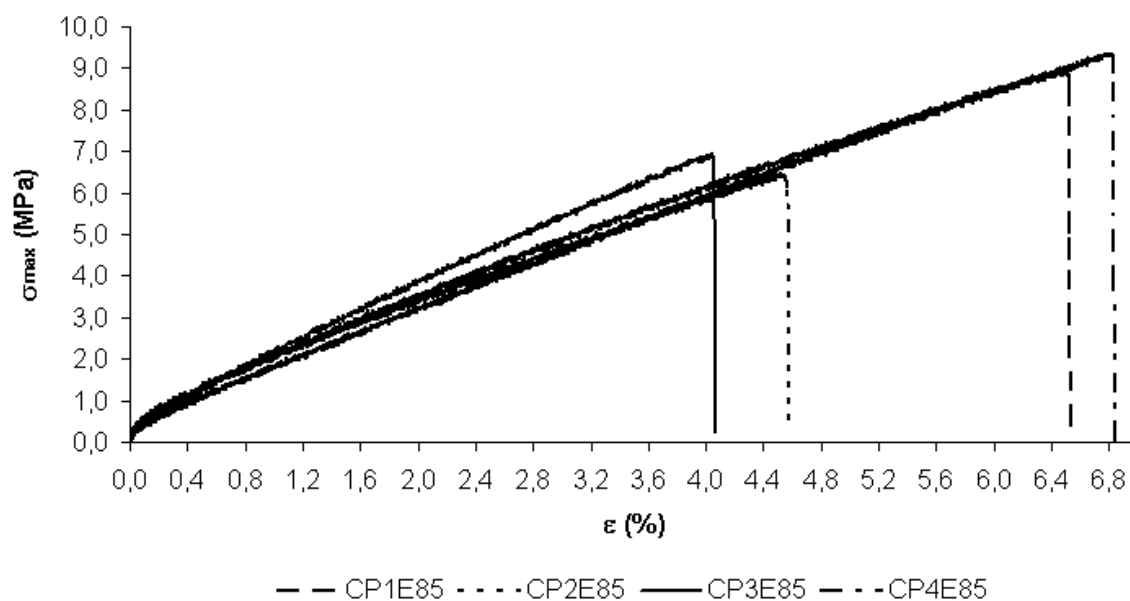


Figura 95 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 85°C.

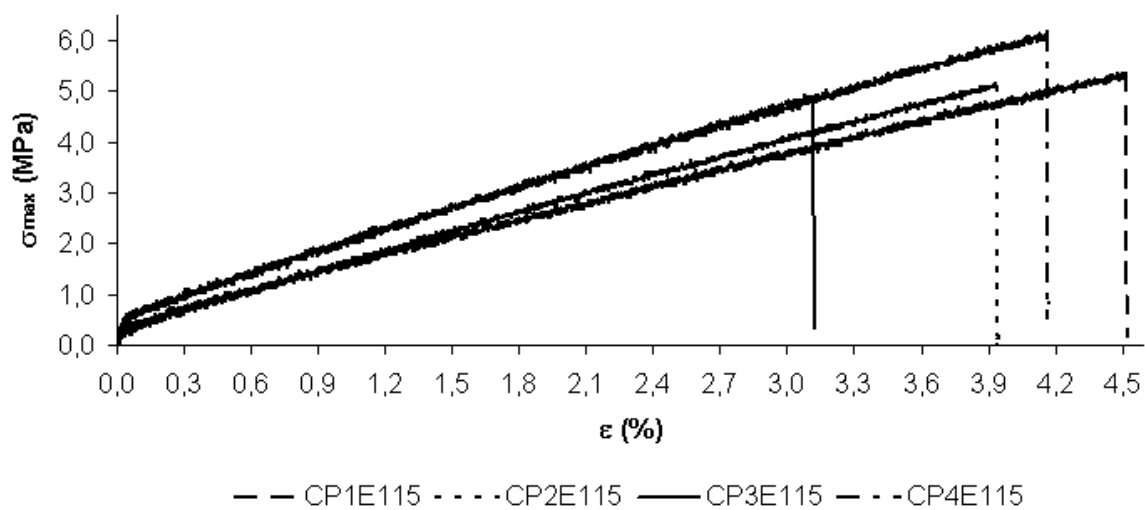


Figura 96 – Curvas tensão-deformação do adesivo nacional a 115°C.

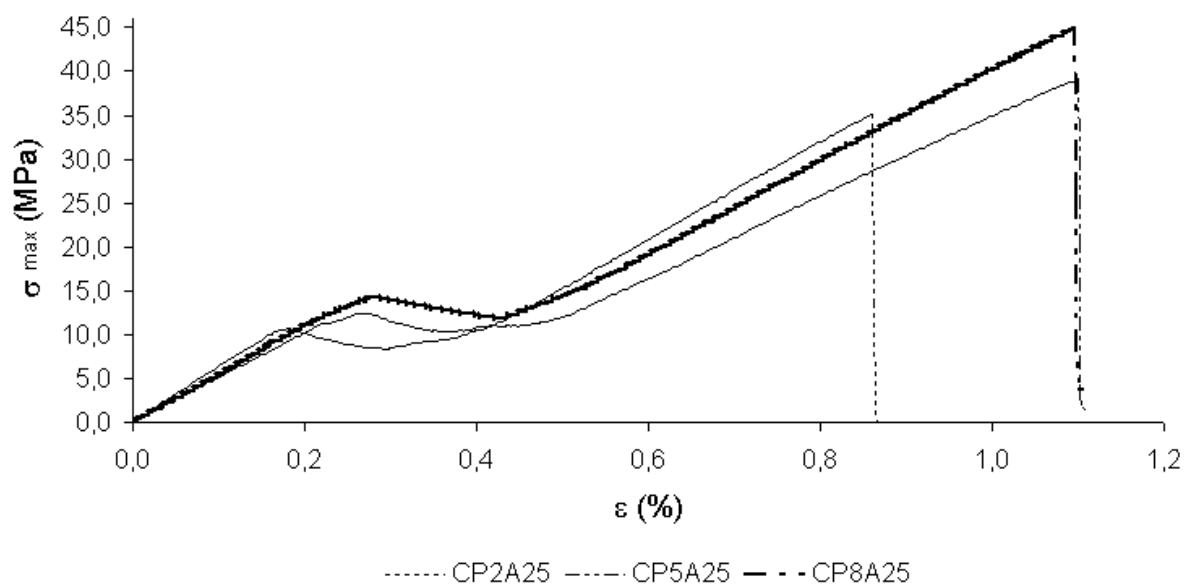


Figura 97 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 25°C.

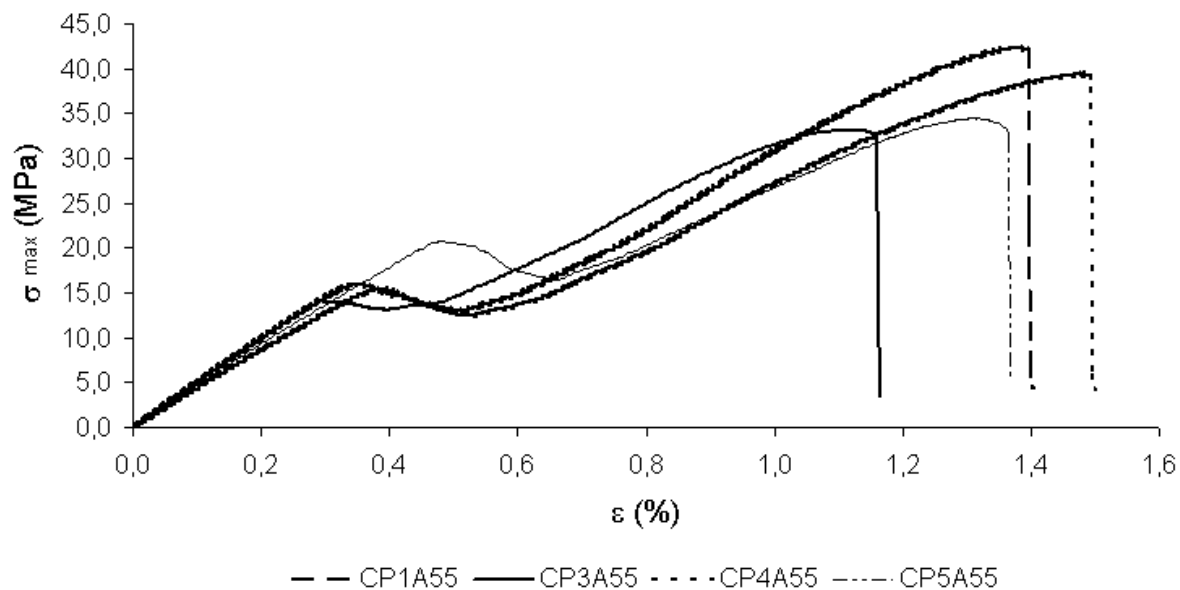


Figura 98 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 55°C.

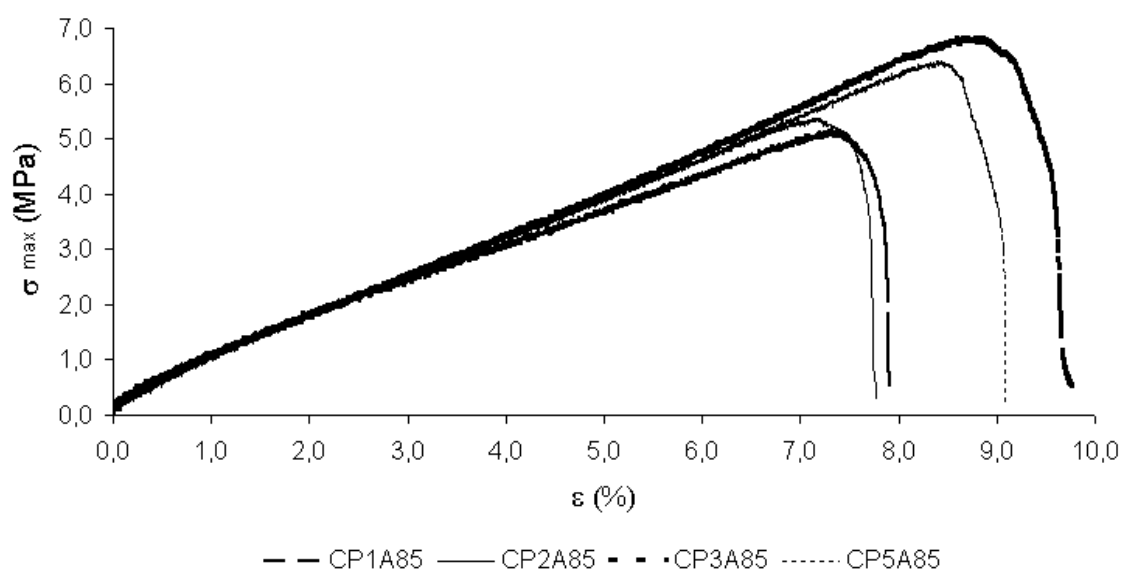


Figura 99 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 85°C.

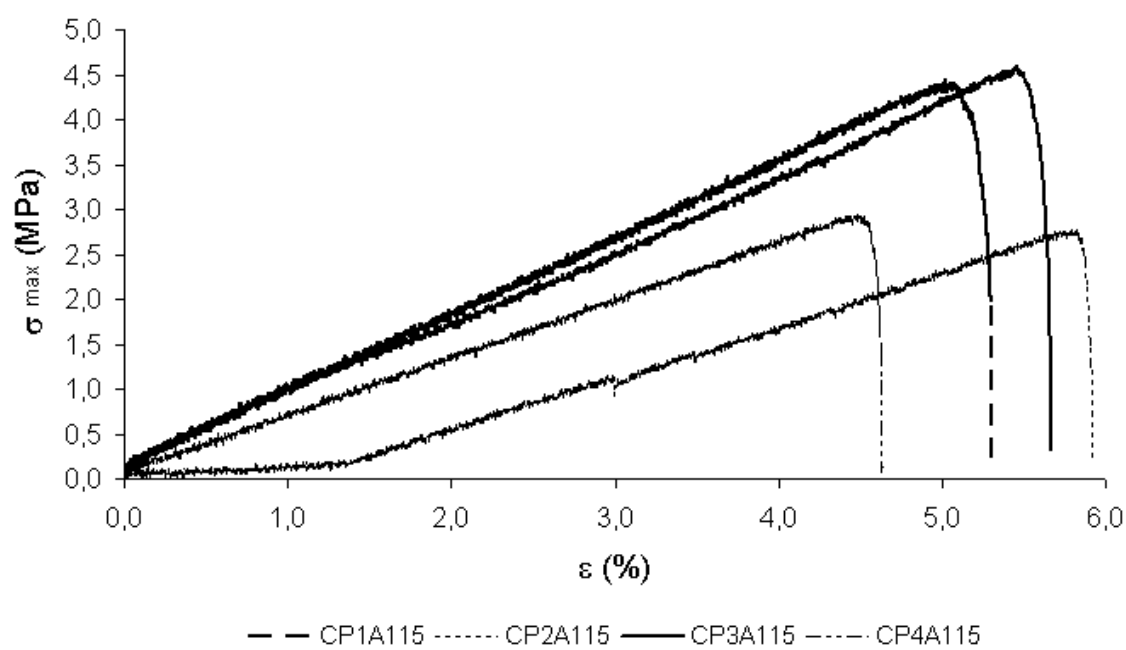


Figura 100 – Curvas tensão-deformação do adesivo importado a 115°C.

Tabela 59 – Resumo das propriedades mecânicas do adesivo nacional.

Resumo de tensão de ruptura (σ_{rup})								
Temperatura (°C)	mínimo (MPa)	máximo (MPa)	média (MPa)	s (MPa)	LS (MPa)	LI (MPa)	CV (%)	PERDA²⁸ (%)
25	61,09	64,73	62,91	2,58	65,49	60,34	4,10	0
55	14,14	17,53	15,91	1,53	17,45	14,38	9,64	-75
85	6,44	9,33	7,91	1,43	9,35	6,48	18,11	-87
115	4,94	6,13	5,38	0,52	5,90	4,85	9,76	-91
Resumo de tensão de escoamento (σ_{esc})								
Temperatura (°C)	mínimo (MPa)	máximo (MPa)	média (MPa)	s (MPa)	LS (MPa)	LI (MPa)	CV (%)	PERDA (%)
25	8,26	10,31	9,29	1,45	10,74	7,83	15,63	0
55	7,28	9,99	8,60	1,30	9,90	7,30	15,13	-7
85	2,15	0,23	5,50	0,16	5,66	5,35	2,89	-41
115	2,28	3,44	2,77	0,54	3,30	2,23	19,37	-70
Resumo de módulo de elasticidade (E)								
Temperatura (°C)	mínimo (GPa)	máximo (GPa)	média (GPa)	s (GPa)	LS (GPa)	LI (GPa)	CV (%)	PERDA (%)
25	7,18	9,30	8,24	1,50	9,74	6,74	18,19	0
55	0,88	1,30	1,10	0,20	1,31	0,90	18,53	-87
85	0,18	0,23	0,21	0,02	0,23	0,18	11,03	-98
115	0,15	0,18	0,16	0,02	0,18	0,15	10,36	-98
Resumo de deformação de ruptura (ϵ_{rup})								
Temperatura (°C)	mínimo (%)	máximo (%)	média (%)	s (%)	LS (%)	LI (%)	CV (%)	
25	1,40	1,55	1,47	0,11	1,58	1,36	7,50	
55	3,70	4,11	3,93	0,18	4,11	3,75	4,69	
85	4,06	6,84	5,50	1,39	6,89	4,12	25,21	
115	3,13	4,52	3,94	0,59	4,54	3,35	15,06	
Resumo de deformação de escoamento (ϵ_{esc})								
Temperatura (°C)	mínimo (%)	máximo (%)	média (%)	s (%)	LS (%)	LI (%)	CV (%)	
25	0,19	0,24	0,22	0,04	0,26	0,18	18,41	
55	0,85	0,93	0,88	0,04	0,92	0,85	3,97	
85	1,07	1,53	1,27	0,19	1,46	1,08	14,90	
115	1,64	2,12	1,78	0,23	2,01	1,55	12,90	

²⁸ Perda em relação a referência (25°C).

Tabela 60 – Resumo das propriedades mecânicas do adesivo importado.

Resumo de tensão de ruptura (σ_{rup})								
Temperatura (°C)	mínimo (MPa)	máximo (MPa)	média (MPa)	s (MPa)	LS (MPa)	LI (MPa)	CV (%)	PERDA (%)
25	35,04	44,96	39,71	4,98	44,69	34,72	12,55	0
55	33,16	42,25	37,30	4,24	41,54	33,06	11,36	-6
85	5,15	6,83	5,94	0,81	6,75	5,13	13,61	-85
115	2,94	4,60	3,99	0,91	4,89	3,08	22,79	-90
Resumo de tensão de escoamento (σ_{esc})								
Temperatura (°C)	mínimo (MPa)	máximo (MPa)	média (MPa)	s (MPa)	LS (MPa)	LI (MPa)	CV (%)	PERDA (%)
25	9,05	13,22	11,14	2,09	13,23	9,06	18,71	0
55	13,44	20,17	15,75	3,02	18,76	12,73	19,16	41
85	4,91	6,74	5,81	0,87	6,68	4,94	14,98	-48
115	2,83	4,24	3,75	0,80	4,55	2,95	21,35	-66
Resumo de módulo de elasticidade (E)								
Temperatura (°C)	mínimo (GPa)	máximo (GPa)	média (GPa)	s (GPa)	LS (GPa)	LI (GPa)	CV (%)	PERDA (%)
25	5,11	6,30	5,65	0,60	6,25	5,05	10,67	0
55	4,44	5,11	4,82	0,31	5,13	4,50	6,54	-15
85	0,07	0,08	0,08	0,00	0,08	0,07	3,27	-99
115	0,06	0,08	0,07	0,01	0,08	0,06	13,52	-99
Resumo de deformação de ruptura (ϵ_{rup})								
Temperatura (°C)	mínimo (%)	máximo (%)	média (%)	s (%)	LS (%)	LI (%)	CV (%)	
25	0,87	1,11	1,03	0,14	1,17	0,89	13,60	
55	1,17	1,50	1,36	0,14	1,50	1,22	10,38	
85	7,78	9,76	8,64	0,95	9,59	7,68	11,03	
115	4,64	5,67	5,20	0,53	5,73	4,68	10,10	
Resumo de deformação de escoamento (ϵ_{esc})								
Temperatura (°C)	mínimo (%)	máximo (%)	média (%)	s (%)	LS (%)	LI (%)	CV (%)	
25	0,24	0,34	0,30	0,05	0,35	0,25	16,76	
55	0,36	0,53	0,43	0,07	0,50	0,35	17,48	
85	6,95	8,90	7,78	0,97	8,75	6,81	12,43	
115	4,52	5,55	5,06	0,52	5,58	4,55	10,20	

Apêndice II – Roteiro de realização dos ensaios hidrostáticos com variação de temperatura

Inicialmente deve-se fixar os flanges cegos nas extremidades do corpo-de-prova a ser ensaiado com anéis de vedação (*o-rings*) de viton de 5" e parafusos ASTM A193 grau b7 rosca UNC 5/8" (Figura 45). Após a fixação dos flanges cegos, procede-se a fixação do cabo de sustentação, além da conexão do transdutor de pressão (TP) e de temperatura de saída (TTS) conforme a Figura 101.



Figura 101 – Detalhes de fixação de cabo de sustentação e da conexão do transdutor de pressão e temperatura (TPT) no corpo-de-prova.

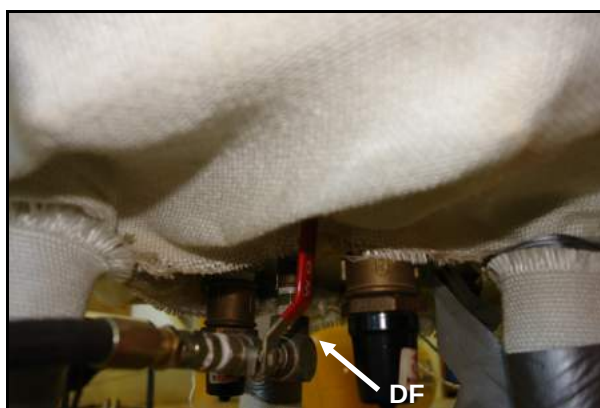
Em seguida, corpo-de-prova deve ser disposto no suporte vertical (Figura 46) para a sua saturação com a instrumentação de deslocamento (*LVDT*) não conectada. Para a saturação a válvula agulha do dreno de saturação (DS) é mantida aberta (Figura 102).

Com a válvula esfera do dreno de fundo fechada (Figura 103a), deve-se posteriormente encher o reservatório térmico conectando a mangueira de água fria no terminal (Figura 103b) abrindo-se a válvula esfera de abastecimento de água fria (VA). Deve-se estar aberta também a válvula agulha controladora de pressão (VCP), conforme se pode visualizar na Figura 103b. Deve estar fechada a válvula esfera da caixa (VC), para que não haja retorno de água à caixa da Linha K. Por outro lado a

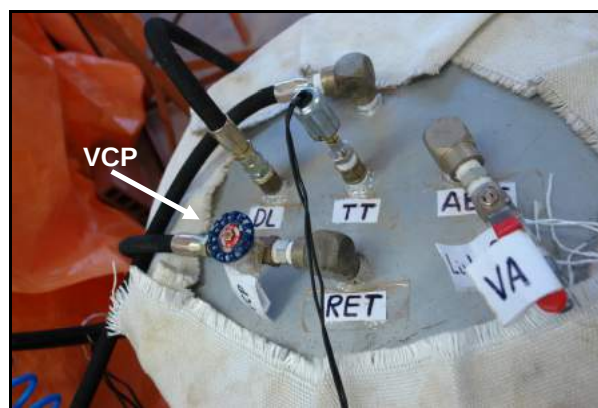
válvula esfera do dreno ladrão (DL) deve estar aberta para jorrar água ao final da linha drenante total (Linha J) quando reservatório estiver cheio (Figura 102).



Figura 102 – Coletor drenante geral e detalhes da válvula agulha do dreno de saturação (DS), da válvula esfera do dreno ladrão (DL) e da válvula esfera da caixa (VC).



(a)



(b)

Figura 103 – (a) Detalhe da válvula esfera do dreno de fundo (DF) e (b) detalhe da válvula esfera de abastecimento do reservatório térmico (VA) e da válvula agulha controladora de pressão (VCP).

Em seguida, deve-se dar início ao processo de saturação do corpo-de-prova disposto no suporte vertical (Figura 46). Para tanto, inicialmente deve-se ligar a chave do dispositivo de controle da bomba centrífuga elétrica (DBCE) e do dispositivo de controle do reservatório térmico (DRT), conforme as Figuras 35 e 36. A saturação do sistema deve ser efetuada inicialmente no ponto de escorva (PE) da bomba centrífuga elétrica (BCE), abrindo-se a válvula esfera de bloqueio de alimentação hidráulica (VEB-

1) e a válvula agulha alívio de pressão (VA-1) do *SKID* da bomba hidropneumática (BH-1), conforme Figura 104.

Para iniciar a circulação de água, no *software* de sensoriamento de dados estipula-se uma ciclagem de 10 minutos da bomba BCE para saturação do corpo-de-prova. A saturação estará completa quando o sistema jorrar água ao final do coletor drenante total (Linha J, Figura 28). Desta forma deve-se fechar completamente a válvula do dreno de saturação (DS), que pode ser visualizado na Figura 102. Ressalta-se que o sistema deve ainda ciclar por aproximadamente 15 segundos depois de saturado. Ao final deste período deve-se fechar a válvula agulha de alívio de pressão (VA-1) presente no *SKID* de ensaio (Figura 104b). O encerramento da ciclagem é efetuado no *software* de sensoriamento de dados.

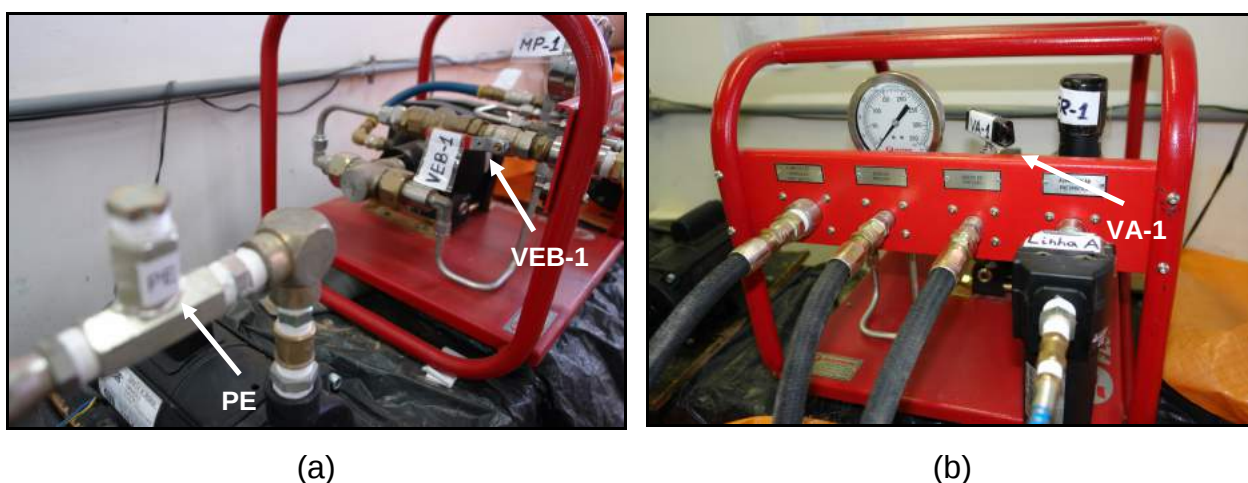


Figura 104 – *SKID* de ensaio hidrostático (a) Detalhe do ponto de escorva (PE) e da válvula VEB-1 e (b) detalhe da válvula VA-1.

Após a saturação do corpo-de-prova, deposita-se este no suporte horizontal (Figura 105) e inicia-se o processo de instalação dos *LVDTs* e posicionamento do termopares de contato. Os *LVDTs* são fixados em suportes, sendo estes colados no corpo-de-prova nas juntas monitoradas (Figuras 47 a 50).



Figura 105 – Deposição do corpo-de-prova no suporte horizontal.

Após a fixação dos *LVDTs*, procede-se ligando a fonte de alimentação do amplificador de sinal do transdutor de pressão (24 V) e dos *LVDTs* (5 V). Em seguida, zera-se a posição dos *LVDTs* por meio do *software* de leitura destes. O mesmo armazena em um arquivo de dados a posição inicial em que a haste do transdutor se encontra. A partir disto, no momento em que se inicia o monitoramento de dados, a cada segundo o *software* armazena o deslocamento sofrido por esta haste e subtrai daquele armazenado.

No que tange ao posicionamento da extremidade dos transdutores de contato (TCT e TCTA) aplica-se pasta térmica na extremidade destes para uniformizar a transferência de calor, conforme apresentado nas Figuras 51 e 52. Após as etapas anteriores, o corpo-de-prova é coberto com uma caixa protetora a fim de se evitar acidentes no momento da ruptura do corpo-de-prova, conforme apresentado na Figura 106.



Figura 106 – Deposição da caixa protetora do corpo-de-prova.

Depois de instalada e calibrada a instrumentação procede-se ligando os aquecedores resistivos do reservatório em tomadas 220V e, especifica-se no *software* de aquisição de dados a temperatura desejada para o desenvolvimento do ensaio. Deve-se ainda estipular o ciclo de funcionamento da bomba centrífuga elétrica (BCE) em minutos.

Logo após a etapa de ciclagem da bomba centrífuga elétrica (2 horas e 30 minutos para juntas coladas), segue-se a pressurização do corpo-de-prova até a sua ruptura. Para tanto, deve-se desligar a bomba BCE por meio da chave do DBCE (Figura 35) encerrando a circulação de água quente. Em seguida, deve-se fechar o sistema através da válvula agulha controladora de pressão (VCP), que pode ser visualizada na Figura 103b.

Para o processo de pressurização é necessário ligar o compressor, aguardando o enchimento do seu reservatório (Figura 33) e, posteriormente, por meio do filtro regulador de pressão de ar deve-se aplicar 0,18 MPa para dar partida no motor da bomba. O valor de pressão de ar comprimido é indicado no manômetro de ar (MA-1). O motor da bomba hidropneumática inicia a sua ciclagem abrindo-se lentamente a válvula bloqueio de ar do motor (VEA-1), conforme evidenciado na Figura 107.



Figura 107 – Detalhe do filtro regulador de ar comprimido (FR-1), válvula de bloqueio de ar (VEA-1) e manômetro de ar comprimido (MA-1).

O ensaio hidrostático deve ser efetuado seguindo as etapas de pressurização apresentadas na metodologia. Ao final da ruptura do corpo-de-prova, procede-se o fechamento das válvulas de bloqueio de ar do motor (VEA-1) e de bloqueio de alimentação hidráulica (VEB-1) e abre-se as válvulas de alívio de pressão (VA-1), controladora de pressão (VCP) e da caixa (VC).

Quando o ensaio hidrostático é encerrado, têm-se 8 arquivos de dados referentes a cada canal coletado, isto é, temperatura do fluido no reservatório (TR), temperatura de saída (TTS), temperatura de contato (TCT), pressão do corpo-de-prova, e deslocamentos nas juntas do corpo-de-prova (*LVDTs* 1, 2, 3 e 4), sendo todos monitorados a cada segundo.

Apêndice III – Curvas de monitoramento e estimativa de temperatura nos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos

As Figuras 108 a 111 apresentam as curvas de temperatura do reservatório (TR), a temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT), a temperatura na face da luva (TFL), as temperaturas nas faces do tubo (TFT) e do adesivo (TFA) para os corpos-de-prova CPE1C85, CPE2C85, CPE3C85 e CPE4C85, isto é, nacionais colados submetidos a temperatura de 85°C.

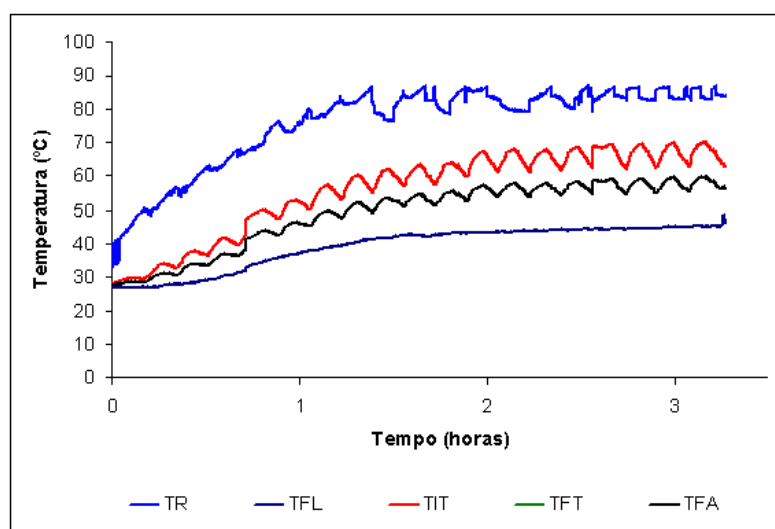


Figura 108 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE1C85.

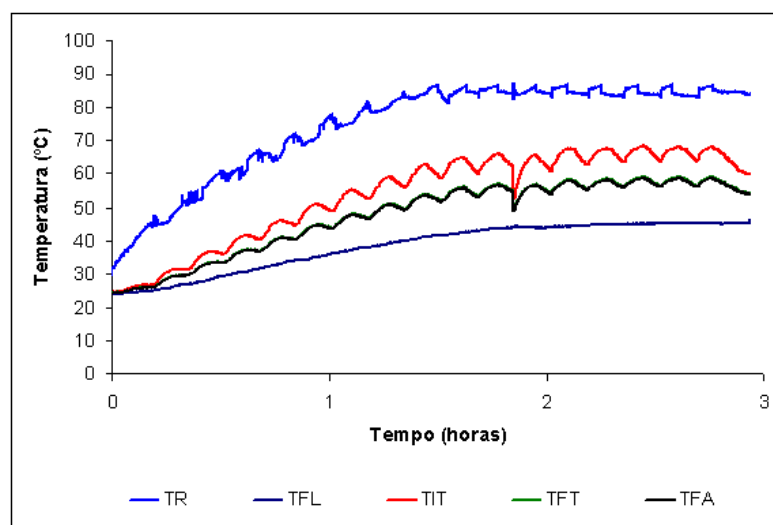


Figura 109 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE2C85.

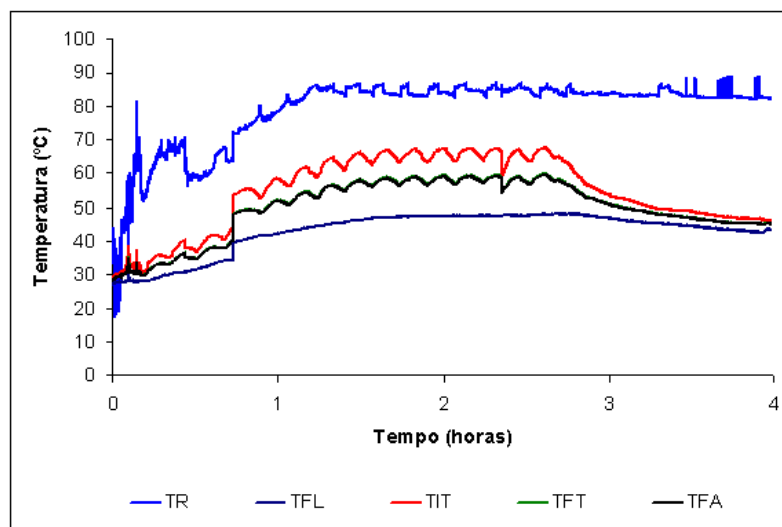


Figura 110 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE3C85.

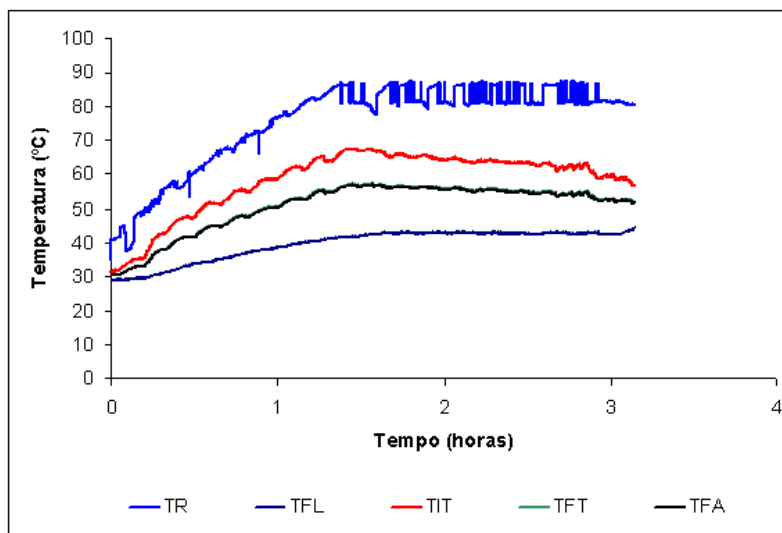


Figura 111 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE4C85.

As Figuras 112 a 114 apresentam as curvas de temperatura do reservatório (TR), a temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT), a temperatura na face da luva (TFL), as temperaturas nas faces do tubo (TFT) e do adesivo (TFA) para os corpos-de-prova CPE1CAMB, CPE2CAMB e CPE3CAMB, isto é, nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

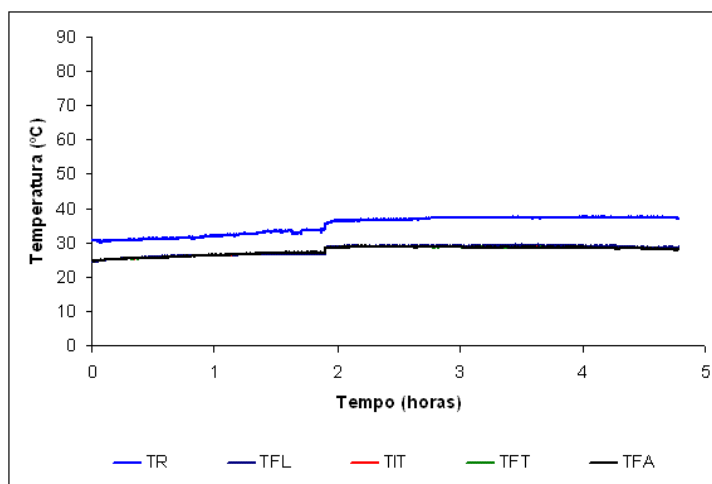


Figura 112 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE1CAMB.

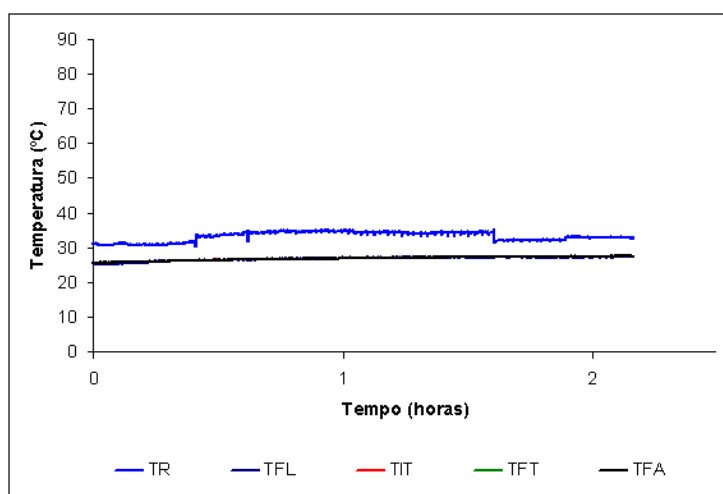


Figura 113 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE2CAMB.

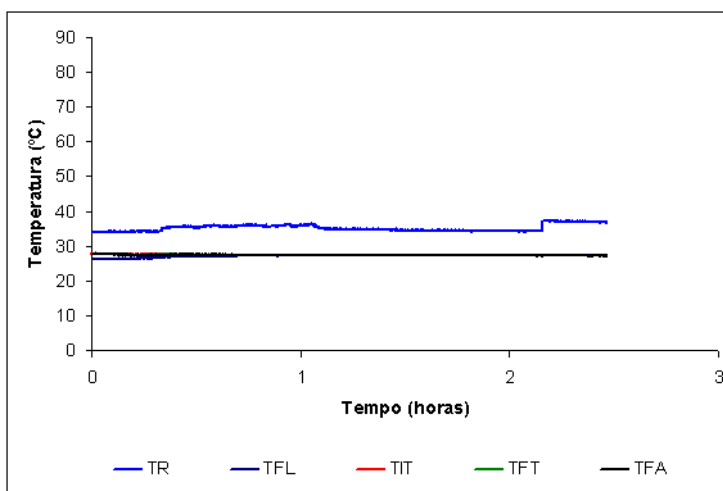


Figura 114 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPE3CAMB.

As Figuras 115 a 117 apresentam as curvas de temperatura do reservatório (TR), a temperatura na face da luva (TFL), a temperatura na face do tubo (TFT), além da temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT) e na face do adesivo (TFA) para os corpos-de-prova CPA1C85, CPA2C85 e CPA3C85, isto é, importados colados submetidos a temperatura de 85°C.

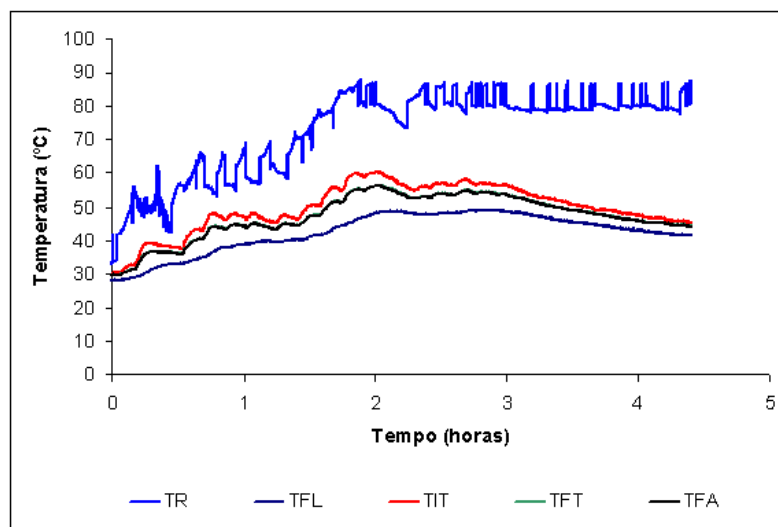


Figura 115 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA1C85.

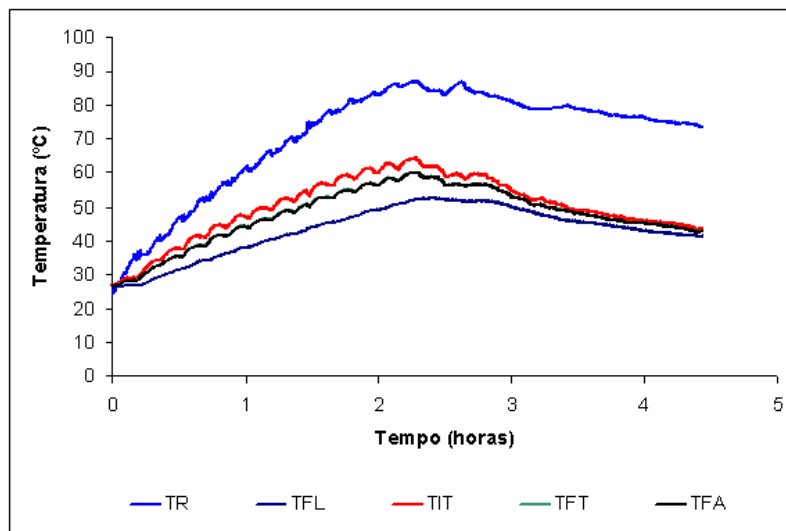


Figura 116 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA2C85.

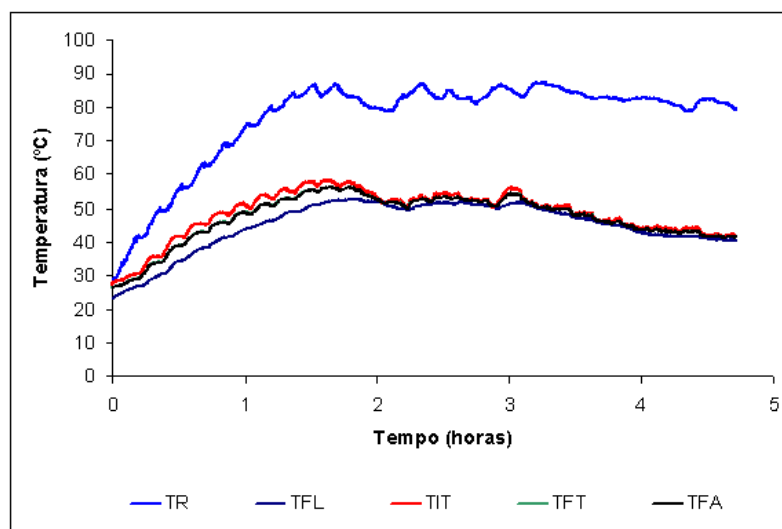


Figura 117 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA3C85.

As Figuras 118 a 120 apresentam as curvas de temperatura do reservatório (TR), a temperatura na face da luva (TFL), a temperatura na face do tubo (TFT), além da temperatura da água no interior do corpo-de-prova (TIT) e na face do adesivo (TFA) para os corpos-de-prova CPA1CAMB, CPA2CAMB e CPA3CAMB, isto é, importados colados submetidos a temperatura ambiente.

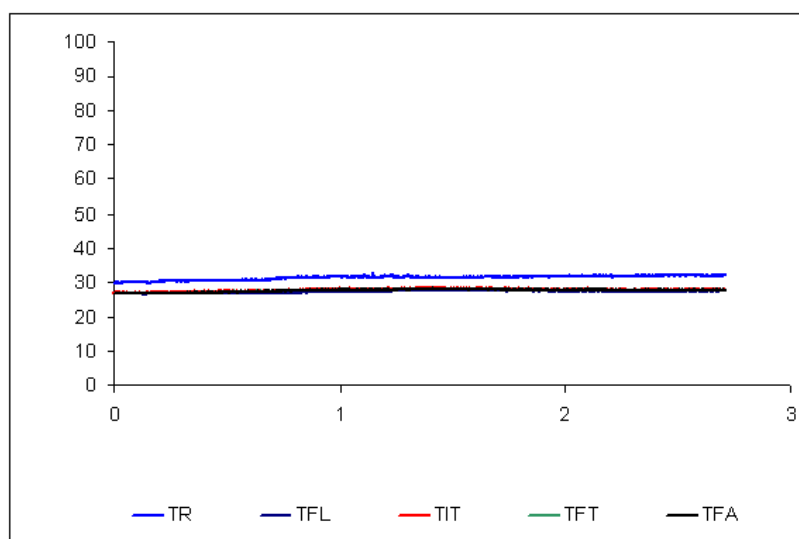


Figura 118 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA1CAMB.

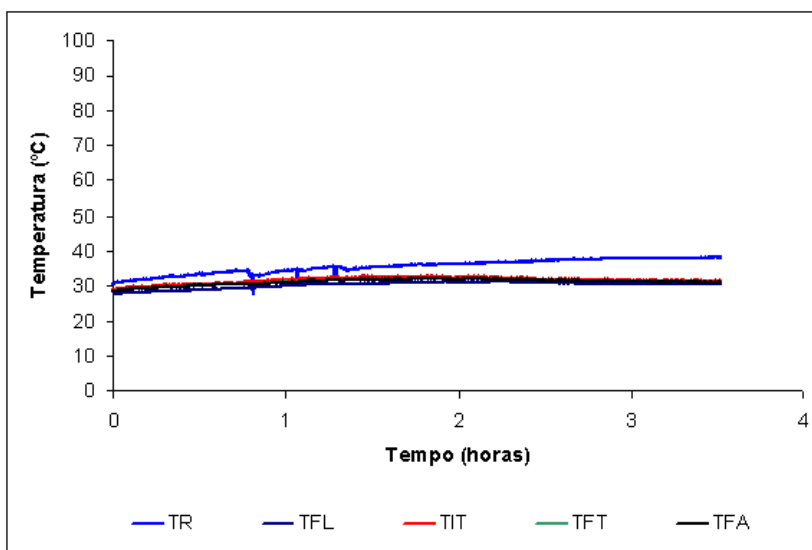


Figura 119 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA2CAMB.

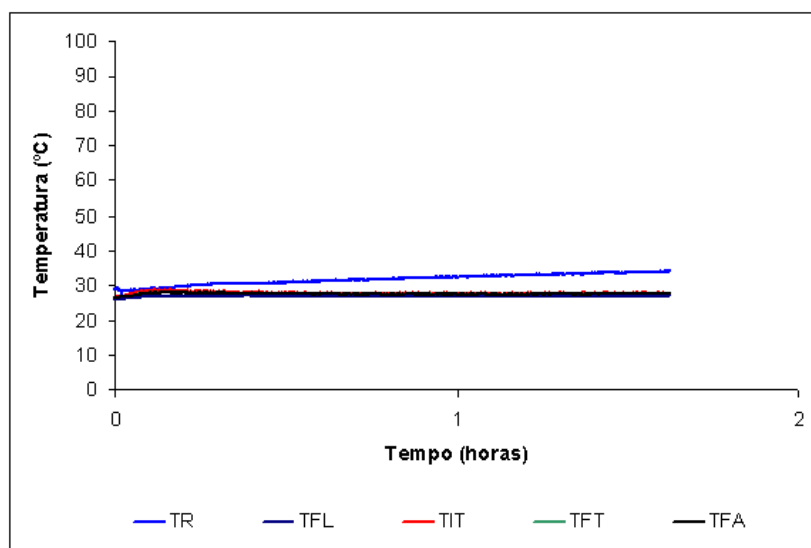


Figura 120 – Monitoramento de temperaturas TR, TFL, TIT, TFT e TFA no corpo-de-prova CPA3CAMB.

Apêndice IV – Curvas de monitoramento de pressão hidrostática nos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos

As Figuras 121 a 124 apresentam as curvas de monitoramento de pressão hidrostática, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1C85, CPE2C85, CPE3C85 e CPE4C85, isto é, nacionais colados submetidos a 85°C.

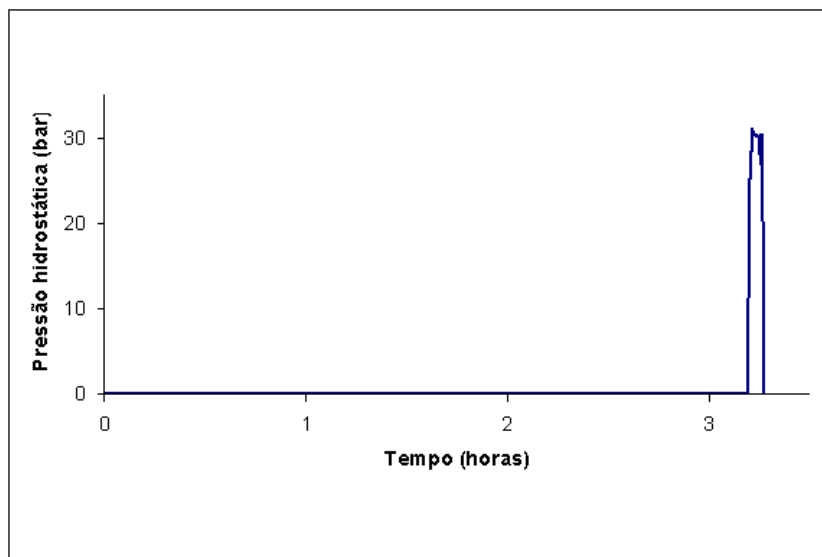


Figura 121 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1C85.

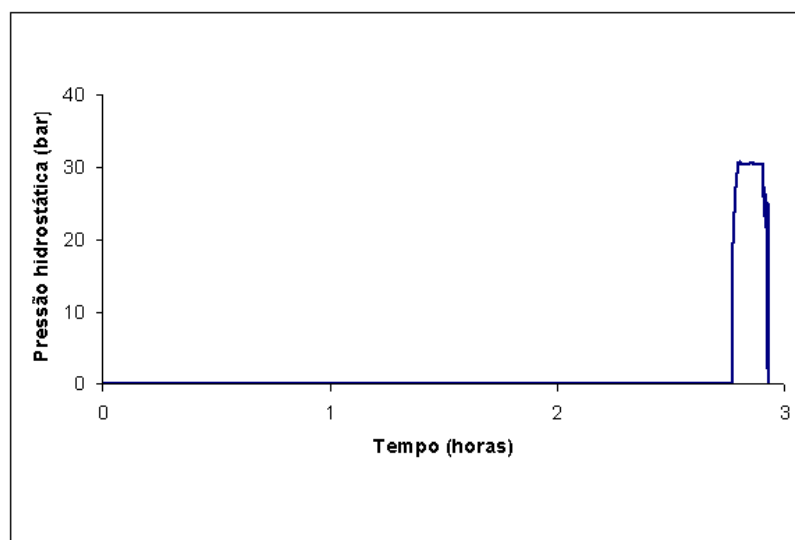


Figura 122 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE2C85.

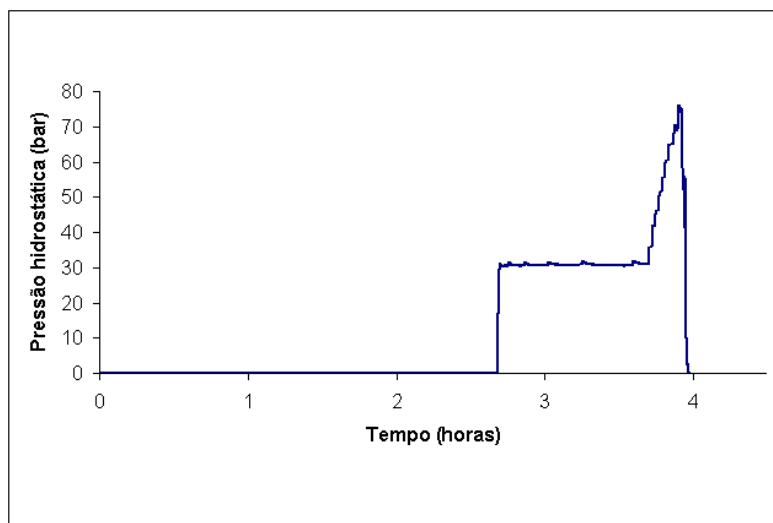


Figura 123 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE3C85.

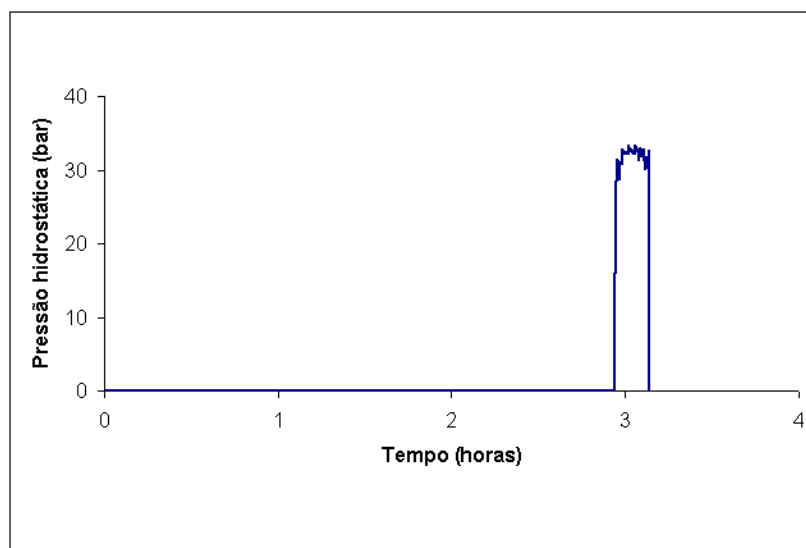


Figura 124 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE4C85.

As Figuras 125 a 127 apresentam as curvas de monitoramento de pressão hidrostática, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1CAMB, CPE2CAMB e CPE3CAMB, isto é, nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

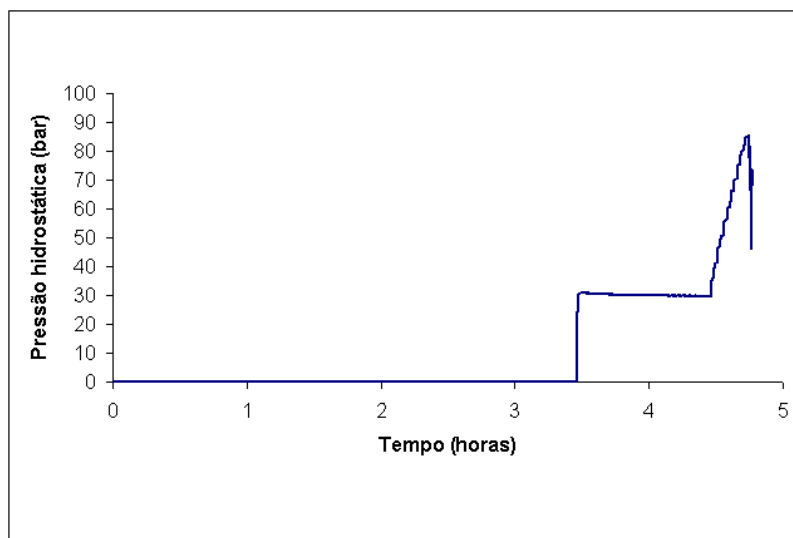


Figura 125 – Monitoramento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1CAMB.

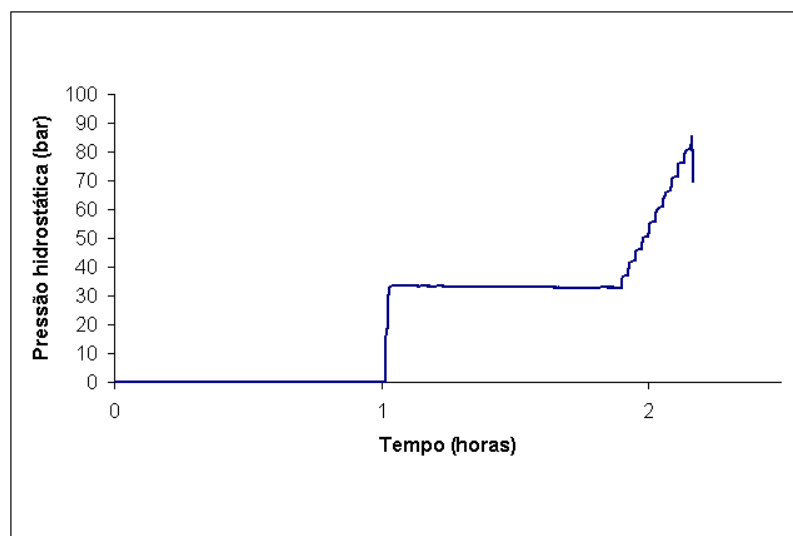


Figura 126 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE2CAMB.

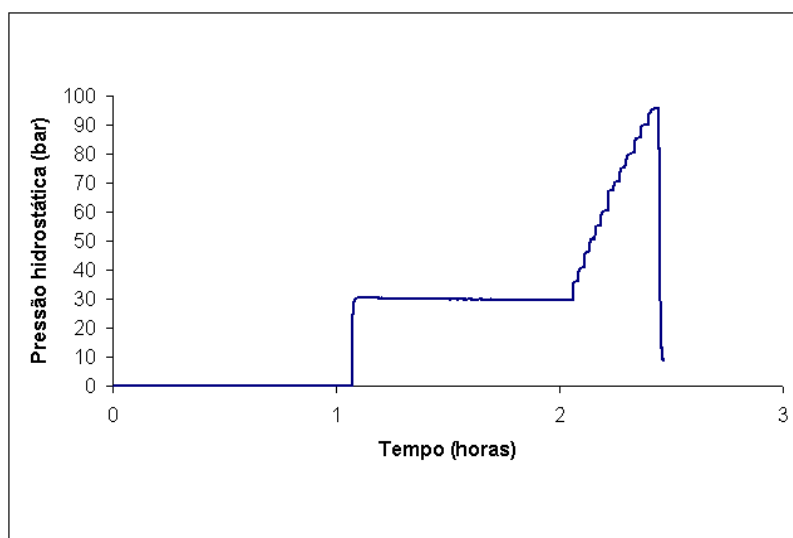


Figura 127 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE3CAMB.

As Figuras 128 e 129 apresentam as curvas de monitoramento de pressão hidrostática, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1L85 e CPE1LAMB, isto é, nacionais laminados submetidos a temperatura de 85°C e a temperatura ambiente.

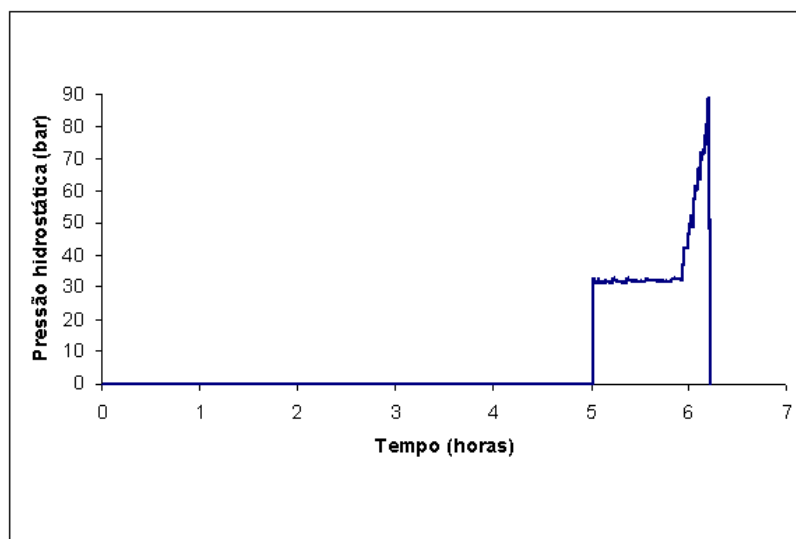


Figura 128 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1L85.

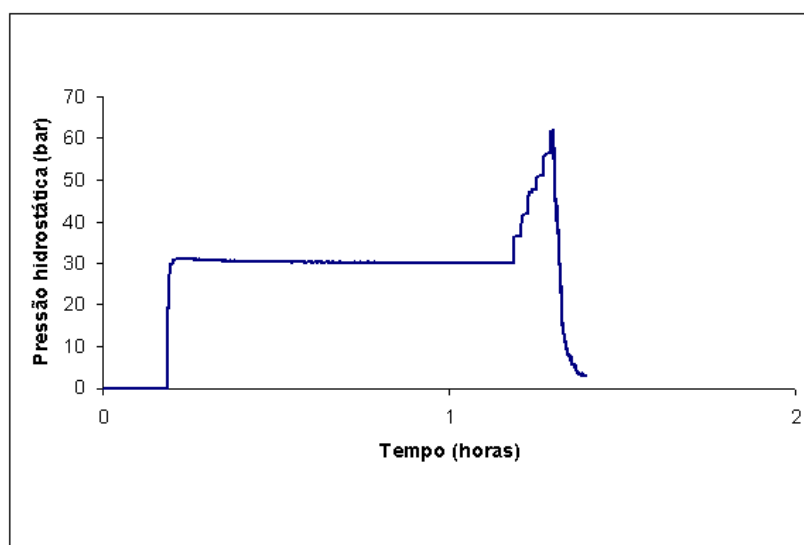


Figura 129 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPE1LAMB.

As Figuras 130 a 132 apresentam as curvas de monitoramento de pressão hidrostática, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPA1C85, CPA2C85 e CPA3C85, isto é, importados colados submetidos a 85°C.

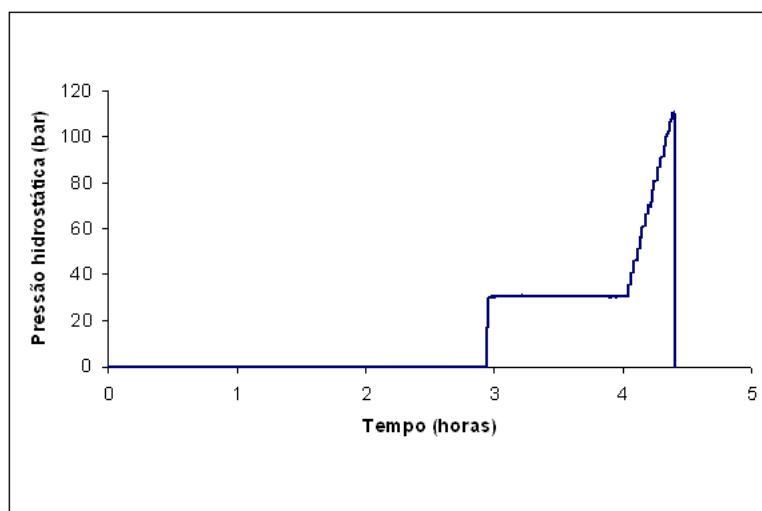


Figura 130 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA1C85.

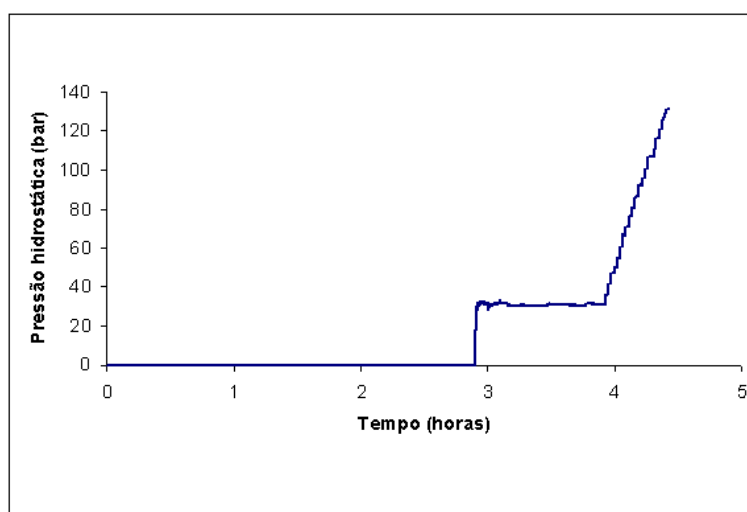


Figura 131 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA2C85.

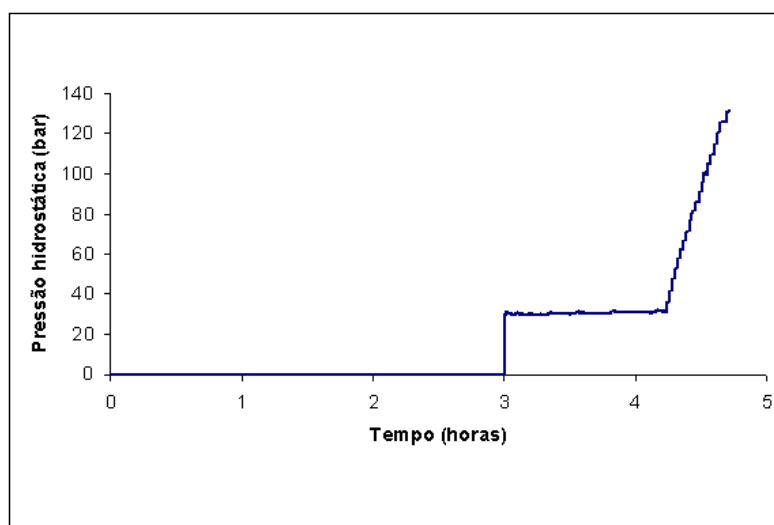


Figura 132 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA3C85.

As Figuras 133 a 135 apresentam as curvas de monitoramento de pressão hidrostática, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPA1CAMB, CPA2CAMB e CPA3CAMB, isto é, importados colados submetidos a temperatura ambiente.

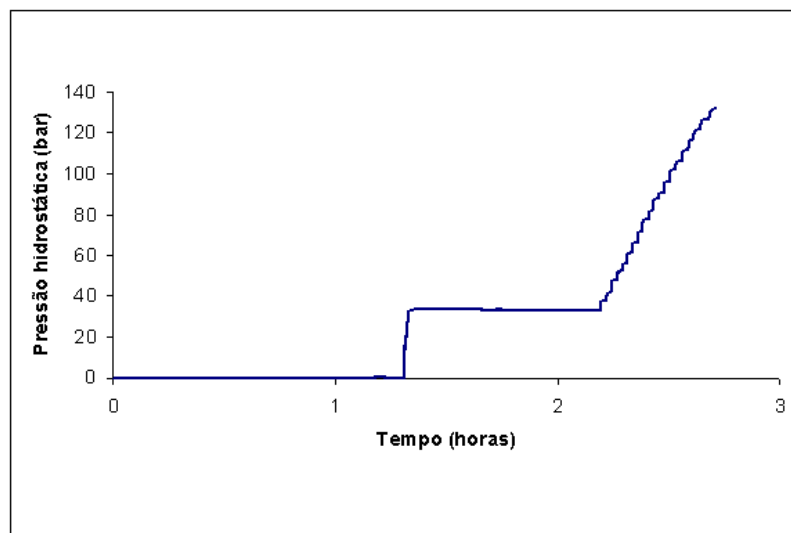


Figura 133 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA1CAMB.

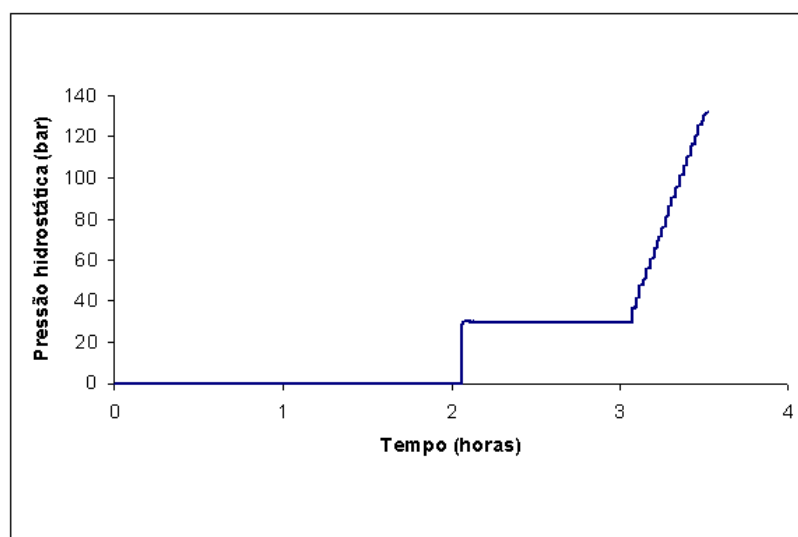


Figura 134 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA2CAMB.

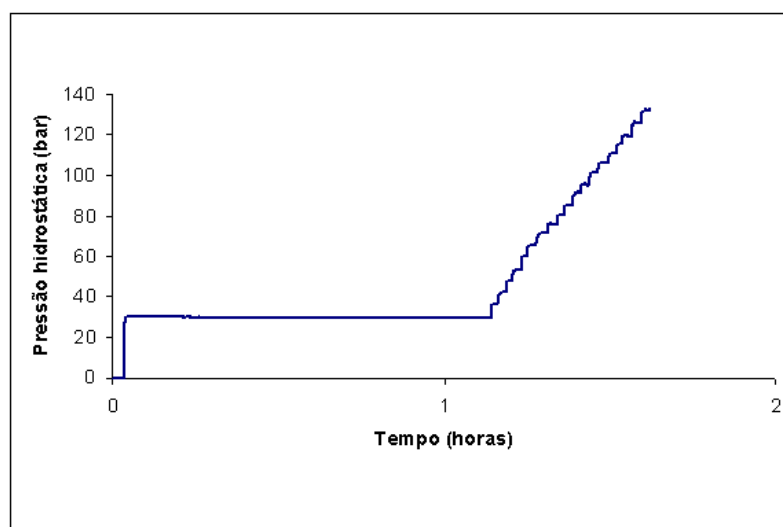


Figura 135 – Desenvolvimento de pressão hidrostática no corpo-de-prova CPA3CAMB.

Apêndice V – Curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios hidrostáticos

As Figuras 136 a 139 apresentam as curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1C85, CPE2C85, CPE3C85 e CPE4C85, isto é, nacionais colados submetidos a 85°C.

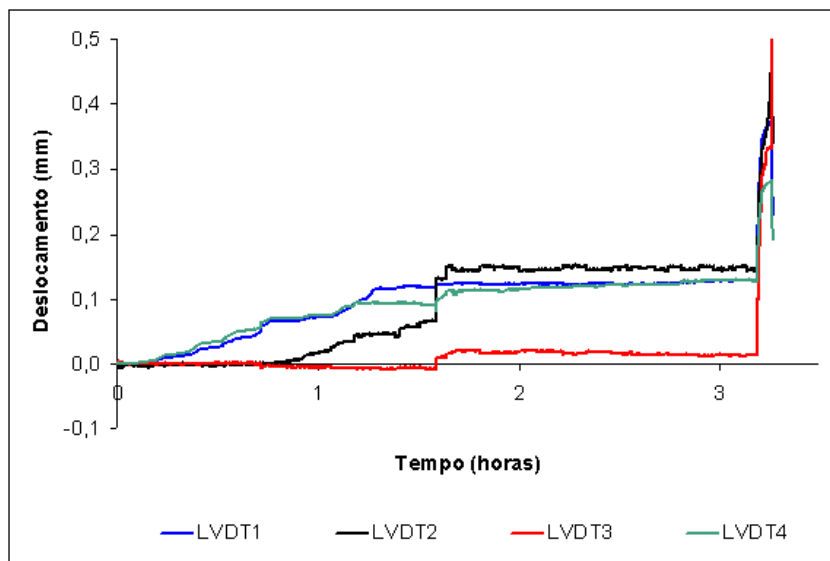


Figura 136 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1C85.

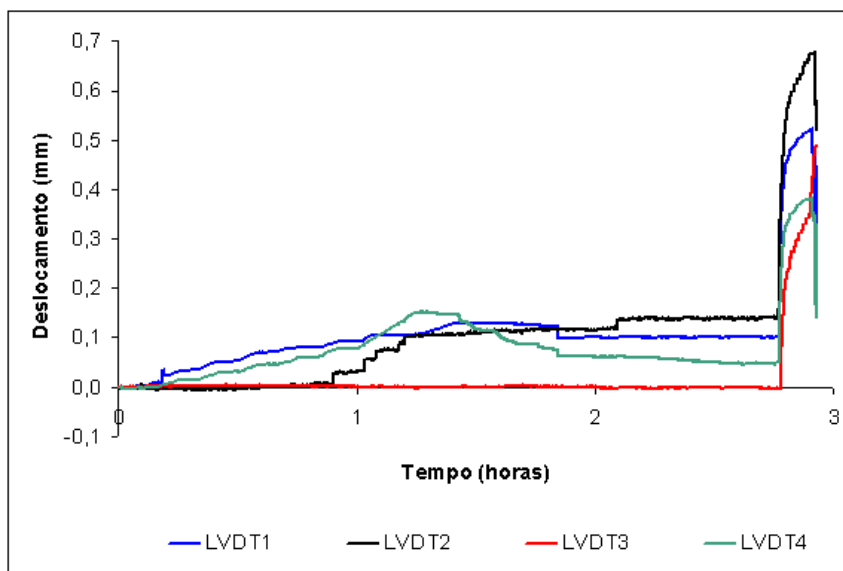


Figura 137 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE2C85.

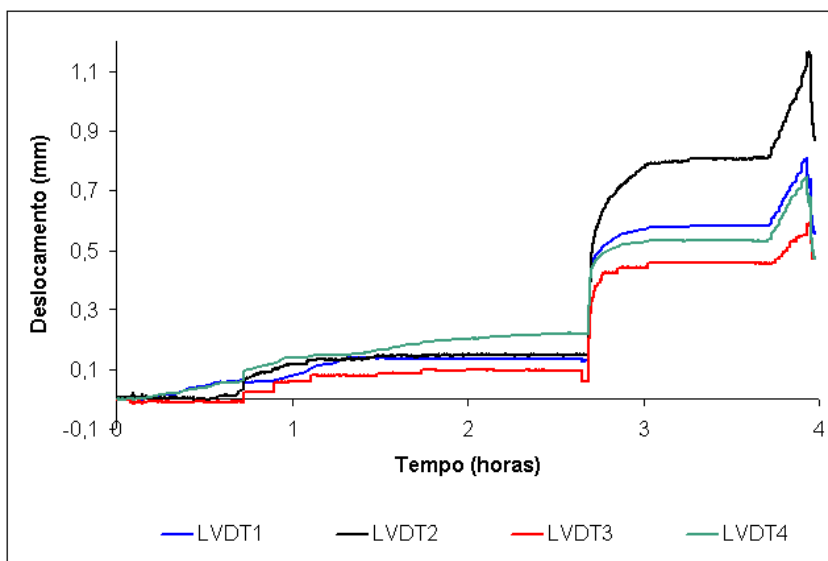


Figura 138 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3C85.

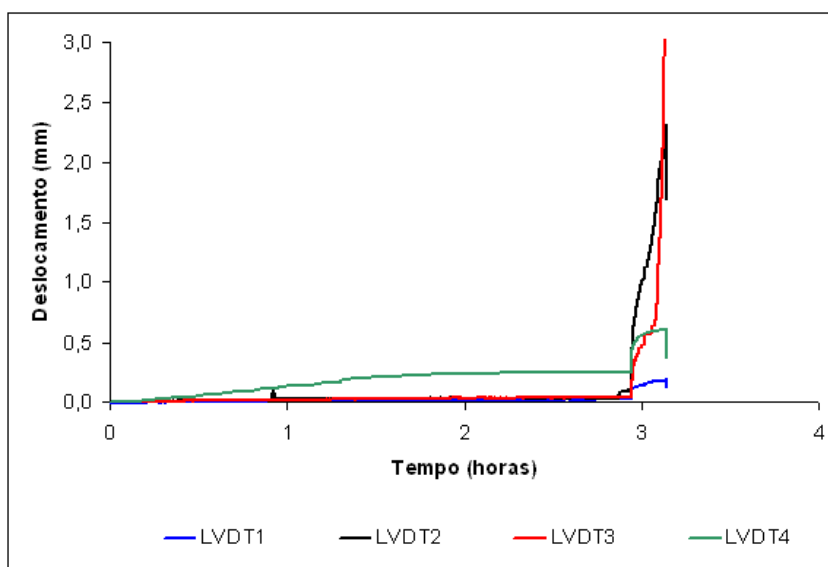


Figura 139 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3C85.

As Figuras 140 a 142 apresentam as curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1CAMB, CPE2CAMB e CPE3CAMB, isto é, nacionais colados submetidos a temperatura ambiente.

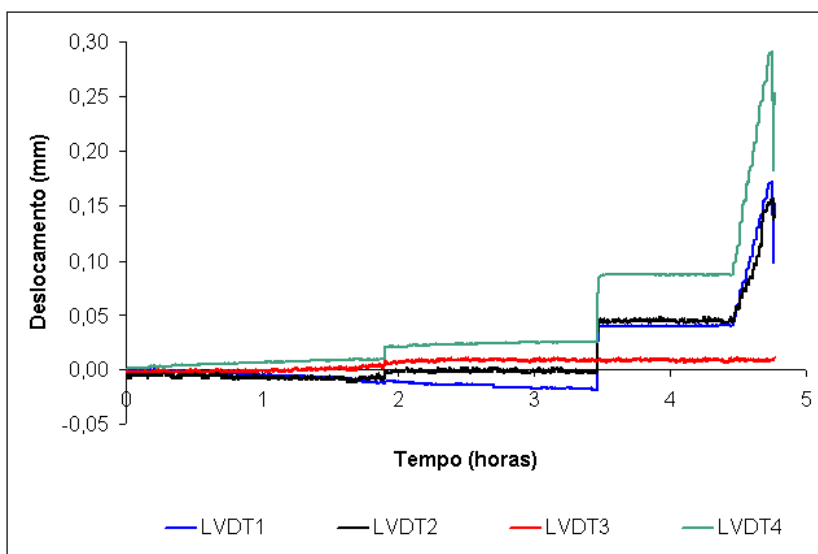


Figura 140 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1CAMB.

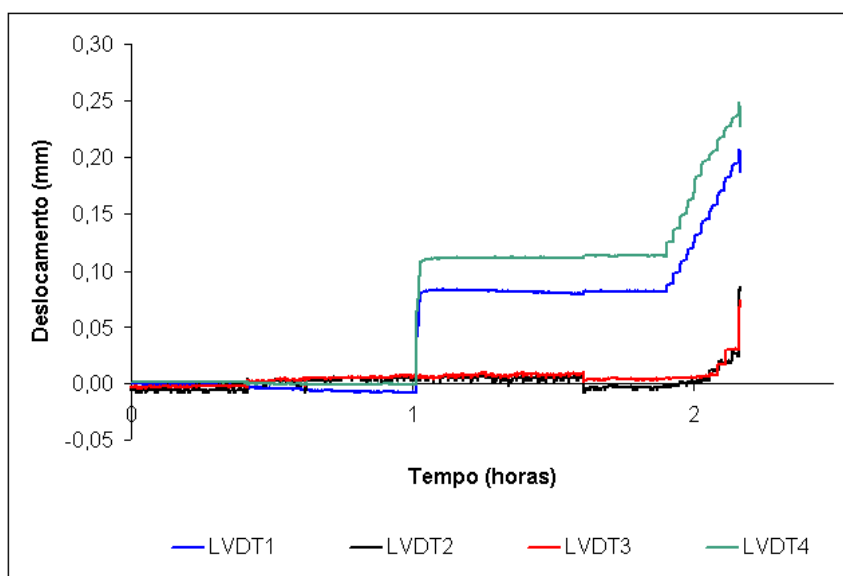


Figura 141 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE2CAMB.

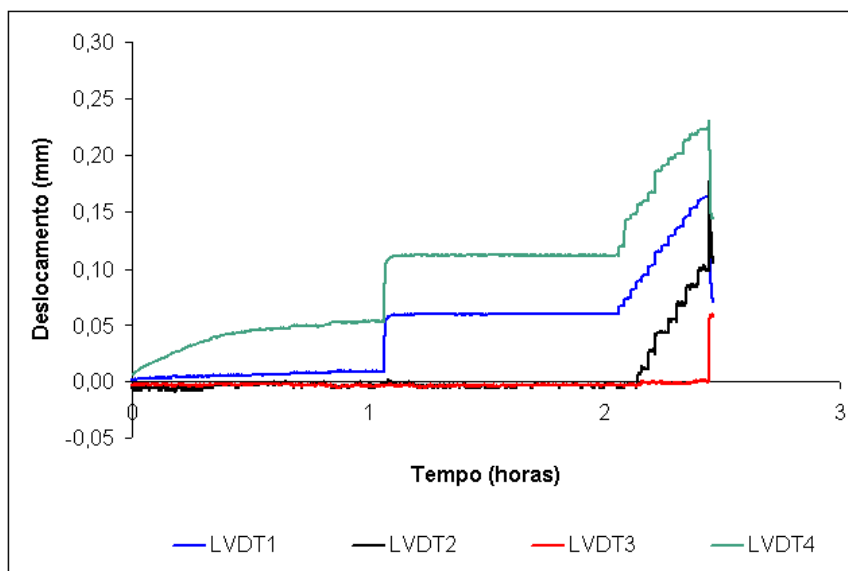


Figura 142 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE3CAMB.

As Figuras 143 e 144 apresentam as curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPE1L85 e CPE1LAMB, isto é, nacionais laminados submetidos a temperatura de 85°C e a temperatura ambiente.

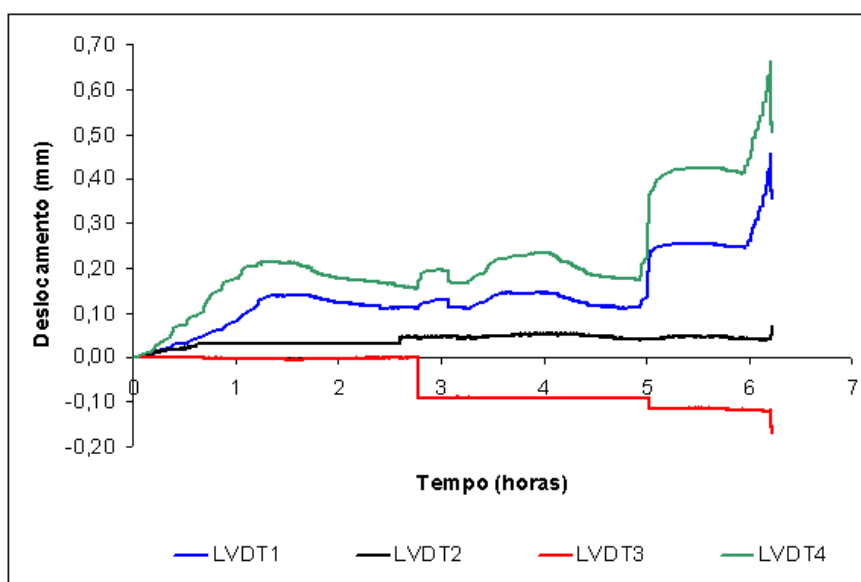


Figura 143 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1L85.

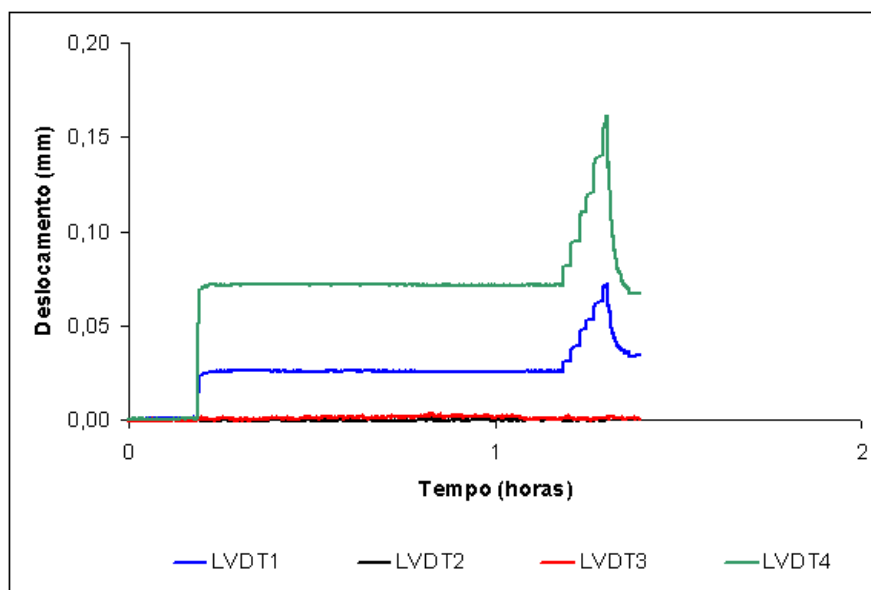


Figura 144 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPE1LAMB.

As Figuras 145 a 147 apresentam as curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPA1C85, CPA2C85 e CPA3C85, isto é, importados colados submetidos a temperatura de 85°C.

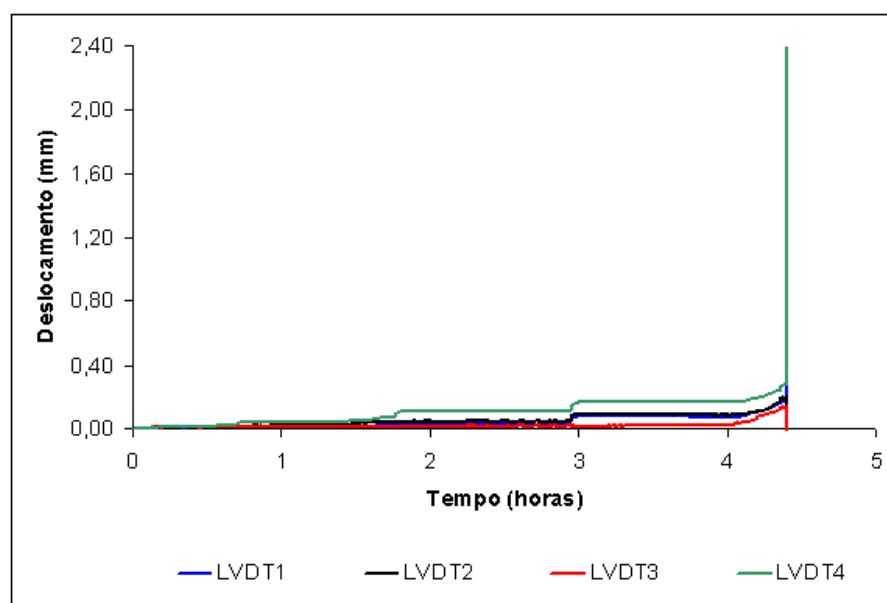


Figura 145 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA1C85.

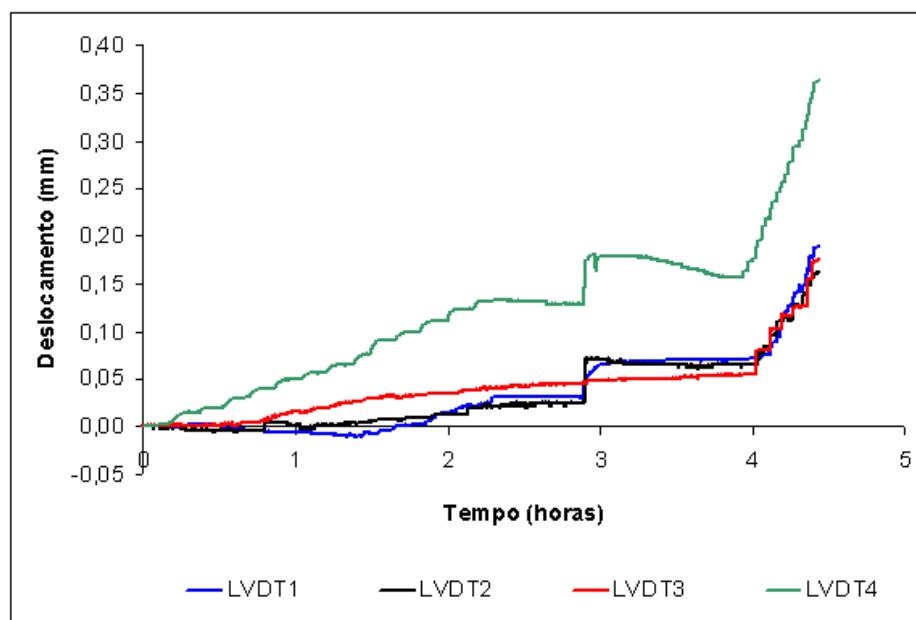


Figura 146 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA2C85.

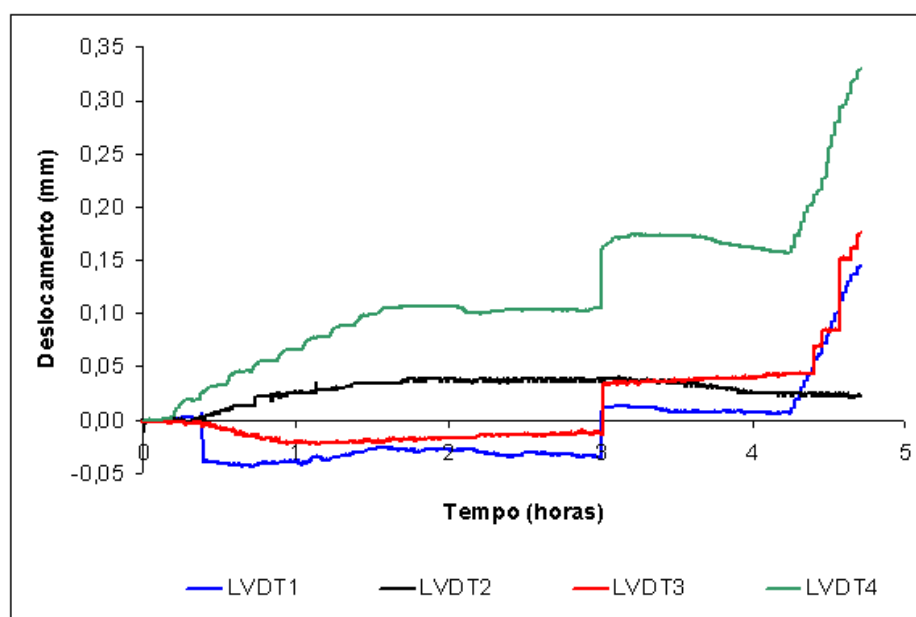


Figura 147 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA3C85.

As Figuras 148 a 150 apresentam as curvas de monitoramento de deslocamentos nas juntas, relativas ao tempo, dos corpos-de-prova CPA1CAMB, CPA2CAMB e CPA3CAMB, isto é, importados colados submetidos a temperatura ambiente.

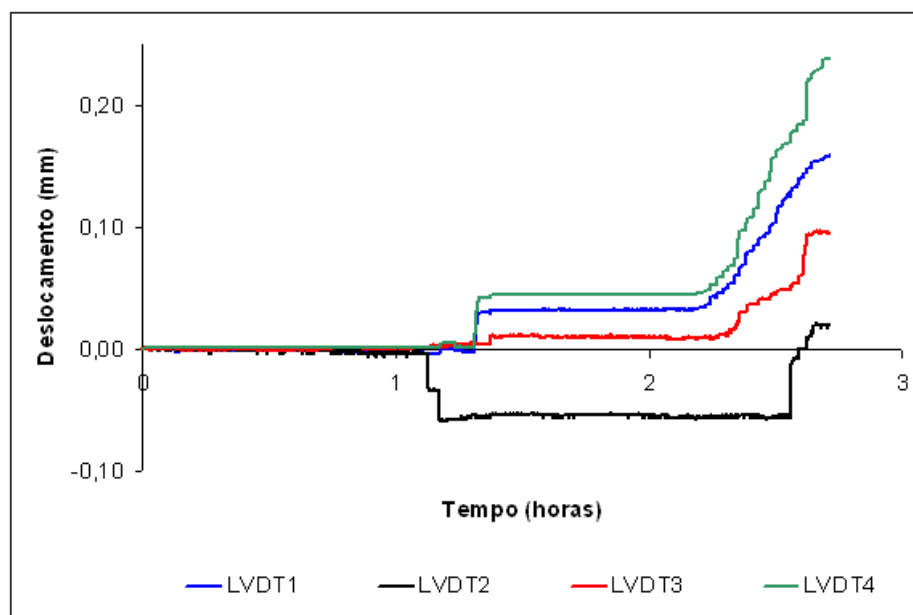


Figura 148 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA1CAMB.

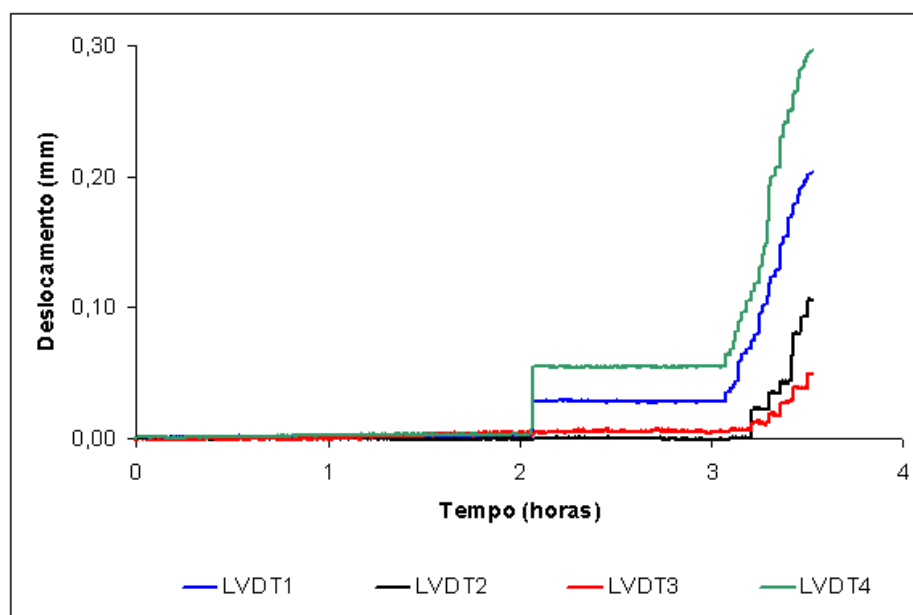


Figura 149 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA2CAMB.

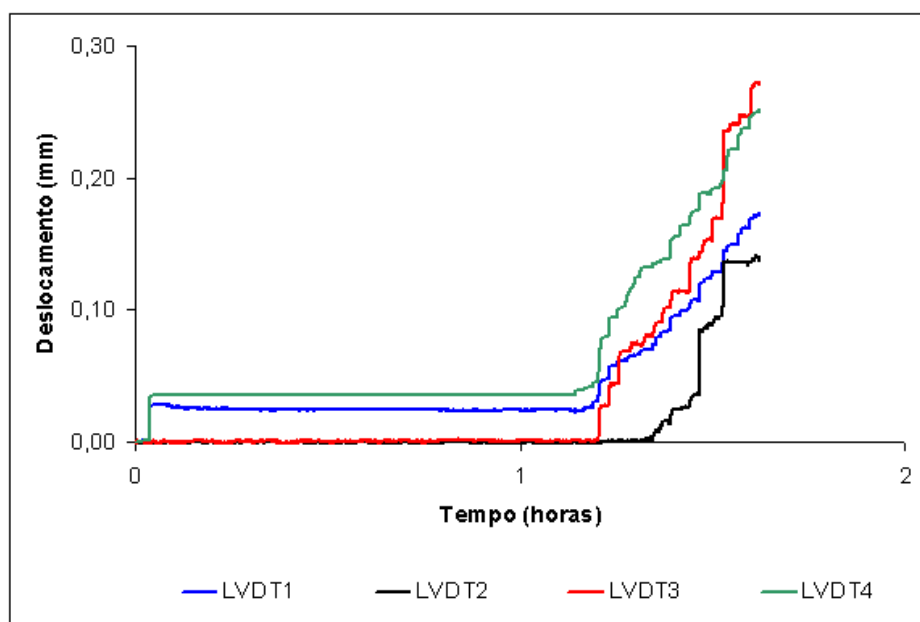


Figura 150 – Monitoramento de deslocamento nas juntas (LVDTs 1, 2, 3 e 4) do corpo-de-prova CPA3CAMB.