

3 – Conexões de Reparo Injetadas com Mistura de Resina Epóxi e Cimento

3.1.Introdução

Durante o levantamento das informações das propriedades mecânicas dos membros tubulares, foi visto que os dados referentes à mistura (em Alves, 1995) foram adquiridos em corpos-de-prova cúbicos. Foram realizados então novos ensaios de compressão da mistura com corpos-de-prova cilíndricos para que se pudesse levantar mais informações e a curva tensão *versus* deformação do material. As vantagens de uso de corpos cilíndricos além das facilidades de moldagem e desmoldagem é o paralelismo entre as faces que estarão paralelas ao plano de aplicação do carregamento axial, além do uso de normas para o ensaio de compressão mais simples.

Os trabalhos de laboratório seguiram os passos descritos no programa experimental original realizado por Alves (1995) e se dividiu em duas partes descritas a seguir.

Neste capítulo são mostrados os trabalhos desenvolvidos nos Laboratórios de Química (Cimentação) e de Integridade Estrutural de Tecnologia Mecânica (TMEC) do Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez – CENPES da Petrobras.

3.2.Materiais

Essa etapa foi realizada no Laboratório de Química (Cimentação) do CENPES da Petrobras, onde foram feitas as misturas dos componentes segundo os dados de Alves (1998). Nesse laboratório, especializado no preparo de amostras de mistura de pasta de cimento usada para revestimento de poços de petróleo, existem equipamentos para o controle em peso de cada componente da MISTURA pretendida e cura a temperatura ambiente e banhos térmicos.

Seguindo a seqüência do programa experimental original foi montada, nas devidas proporções em peso, a composição do material a ser ensaiado de forma que se levantasse o comportamento de uma resina com e sem adição de cimento,

considerado como elemento de carga segundo o relatório do programa experimental de Alves (1995).

Os corpos-de-prova de resina foram confeccionados com as seguintes características:

a) Características geométricas e formas

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro 50 mm x 100 mm de comprimento em formas metálicas (latão). Esses corpos-de-prova foram preparados para os ensaios de compressão para determinação da curva tensão *versus* deformação e o coeficiente de Poisson.

b) Características das Resinas

Seguindo o programa experimental de Alves (1998), foram adquiridos para esse trabalho os seguintes materiais:

Material	Descrição	Viscosidade 25°C(mPas)	Peso Específico a 20°C(g/cm ³)
Araldite [®] GY 1109 BR	Resina Epóxi líquida modificada, de baixa viscosidade, formulada a base de Bisfenol A	1200 a 1600	1,11
Aradur [™] 830 CH	Endurecedor líquido a base de aduto de Poliamida Aromática, livre de solvente	3800 a 5800	1,12
Aradur [™] 850 CH	Endurecedor líquido a base de aduto de Poliamida Aromática, livre de solvente	15000 a 21000	1,13

Tabela 3.1 – Características dos produtos para montagem da resina

Foi realizada uma conferência inicial do peso específico informado na embalagem do fabricante em cada componente selecionado para compor a resina. Constatou-se uma diferença menor que 1% e daí, para se ganhar tempo no laboratório, foi adotado o peso específico informado pelo fabricante, conforme informado na tabela acima.

c) Tempo de cura

O tempo de cura aplicado para o ensaio foi de 21 dias, o mesmo do programa experimental original (Alves, 1995), estabelecido pela API RP 2A, que prevê a resistência à compressão do material para as dimensões do corpo-de-prova cilíndrico descrito acima. No caso de aplicação no campo (fundo do mar), quanto mais tempo o material ficar curando, maior será a resistência adquirida pelo material.

d) Características da mistura de resina

Para os ensaios foram montadas séries de mistura apenas de resina epóxi e de resina epóxi e cimento nas respectivas proporções em peso dos materiais conforme programa experimental de Alves (1998):

Material	Tipo	partes em peso	Densidade	Série
Araldite GY-1109	Resina Epóxi básica	100	1,11	A e B
Aradur A- 830	Endurecedor lento	30	1,12	
Aradur A- 850	Endurecedor rápido	30	1,13	
Cimento Alvorada	G	80	-	C

Tabela 3.2 – Proporções de composição na mistura em peso

Abaixo um resumo dos resultados das moldagens dos corpos-de-prova:

Série	Quant.	Geometria do CP (mm)	Temperatura de cura	Modo de MISTURA
A	4 CP's	Cilíndricos (Ø 50 x 100)	22° C (Ambiente)	manual
B	2 CP's	Cilíndricos (Ø 50 x 100)	70° C (Banho)	manual
<p>Obs.: Foi observado após o tempo de cura que os corpos-de-prova da série A apresentaram uma textura mais opaca e com grande quantidade de bolhas de ar.</p> <p>Os corpos da série B apresentaram-se mais translúcidos e com menor quantidade de bolhas de ar. Estes foram confeccionados para comparação do comportamento da resina quando submetida a uma temperatura próxima da temperatura de escoamento de petróleo (70° C).</p> <p>Todos os corpos-de-provas apresentaram ranhuras em sua superfície, apesar de usar moldes de latão, mas essas ranhuras devem-se ao encaminamento junto às paredes das bolhas de ar saindo do molde.</p>				
C	3 CP's	Cilíndricos (Ø 50 x 100)	22° C (Ambiente)	batedeira
<p>Obs.: Foram obtidos corpos-de-prova com uma textura opaca devido ao cimento e com pequena quantidade de bolhas de ar. Reduziram-se as ranhuras nas paredes.</p>				

Tabela 3.3 – Características da confecção dos corpos-de-prova

e) Abaixo são mostradas algumas imagens do trabalho no laboratório:



Figura 3.1 – Preparação dos moldes e materiais para a MISTURA.

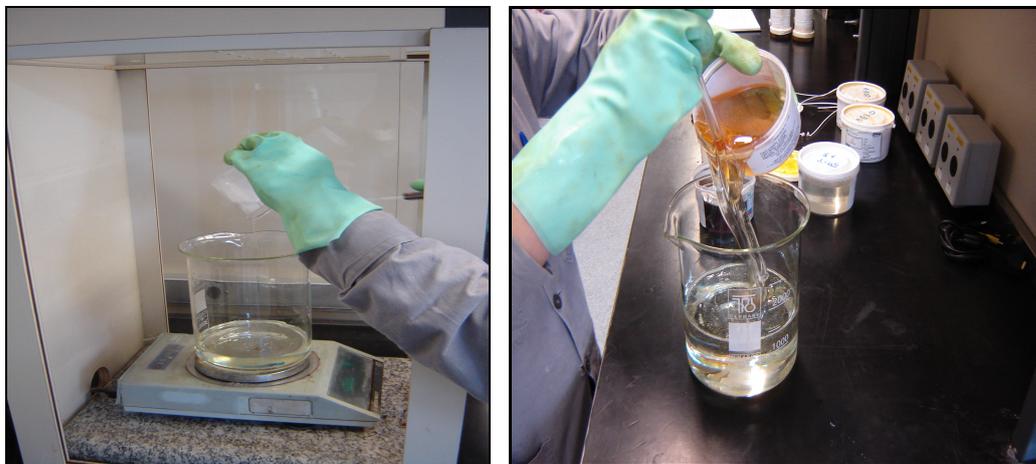


Figura 3.2 - Controle de peso e MISTURA dos componentes



Figura 3.3 - Moldagem e preparação dos CP's para a hibernação de 21 dias

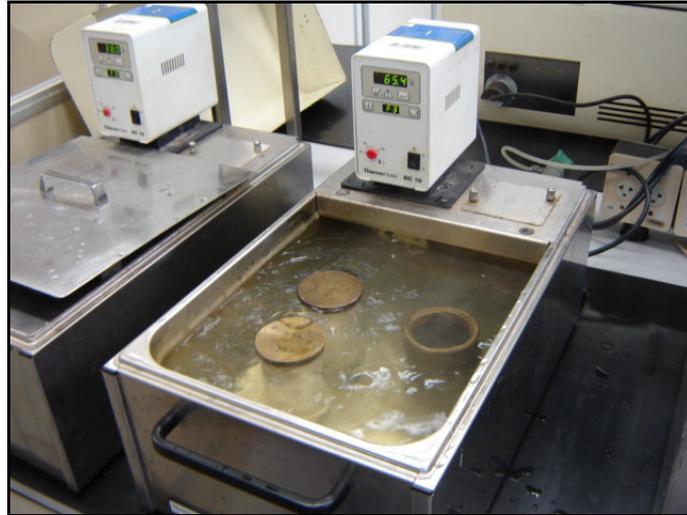


Figura 3.4 – Cura dos corpos-de-prova no banho a 70° C



Figura 3.5 - Corpos-de-prova após a retirada dos moldes cilíndricos. Os corpos cilíndricos apresentando ranhuras e marcar de passagem de bolhas.



Figura 3.6 – Na confecção da MISTURA de resina epóxi e cimento para os corpos-de-prova da série C utilizou-se uma batedeira a baixa rotação. Os corpos cilíndricos mesmo durante a moldagem apresentaram liberação de bolhas muito pequenas e uma textura mais compacta.

3.3. Ensaio de Compressão Axial

3.3.1. Definição de equipamentos e execução do ensaio

O segundo passo desse trabalho foi o levantamento da curva de tensão e deformação do material através do ensaio de compressão dos corpos-de-prova cilíndricos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, da Petrobras.

O ensaio de compressão axial foi o escolhido para se repetir a aplicação de esforços conforme o programa experimental de Alves. Uma vez aplicado o esforço de compressão sobre o topo do tubo, tensões cisalhantes serão criadas entre a parede externa do tubo e a interna da mistura e entre a parede externa da mistura e a interna da luva. Esse mesmo tipo de ensaio foi realizado no programa experimental de Alves em 1995.

Para o ensaio usou-se a seguinte instrumentação:

1) Extensômetros (MTS)

Registro das deformações longitudinais teve como limite 10% da deformação. Calibração segundo a norma ASTM E83-93. Características do equipamento usado:

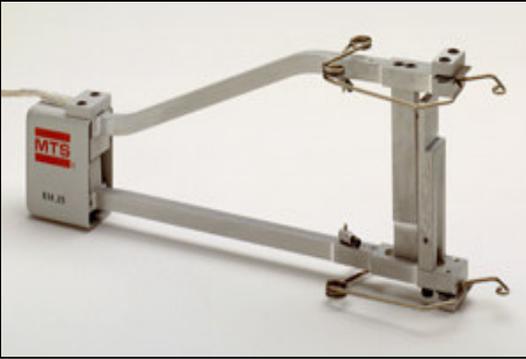
	Modelo	634.25F-24 Axial
	Comprimento do <i>strain gauge</i>	50mm +/- 0,050 mm
	Unidade padrão de medida	métrica
	Máxima deformação	50% a -10%
	Máximo percurso	25,00 a -5,00 mm
	Faixa de temperatura	-85 a 120°C

Figura 3.6 - Extensômetro

2) Strain gauges (Kyowa)

Registrar as deformações circunferenciais.

	Modelo	KFG-5-C1-65 (Y)
	Comprimento <i>strain gauge</i>	5 mm
	Resistência	120,2 +/-0,2 Ω
	Limite temperatura	65°C
	Colagem	Cianoacrilato

Figura 3.7 – Strain gauge

A seqüência de ilustrações a seguir mostra o console de acompanhamento do ensaio de compressão e o decodificador de sinais. A tela de computador reproduzida abaixo retrata os parâmetros controlados e acompanhamento gráfico dos valores de FORÇA x DEFORMAÇÃO. Cada *strain gauge* foi ligado a um canal de leitura diferente (POISON-6 e POISON-7) para referência no acompanhamento do ensaio.

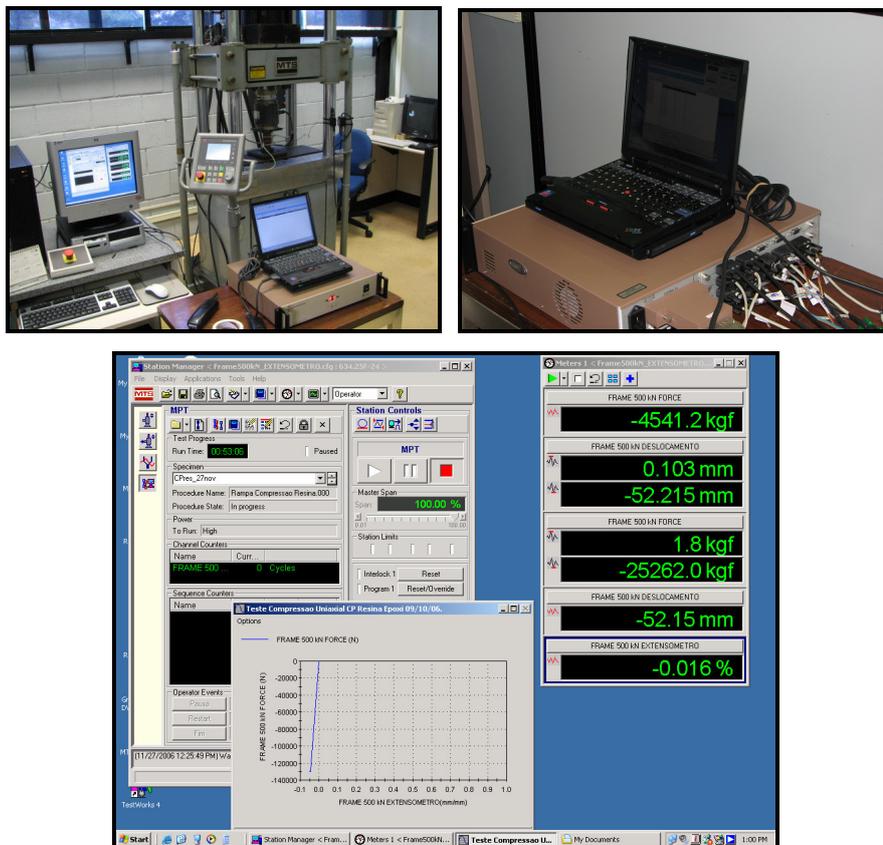


Figura 3.8 - Console de acompanhamento do ensaio de compressão e o decodificador de sinais com um exemplo de tela para monitoração

Abaixo são mostradas algumas imagens do trabalho de preparação dos corpos de prova para uso nesse laboratório:

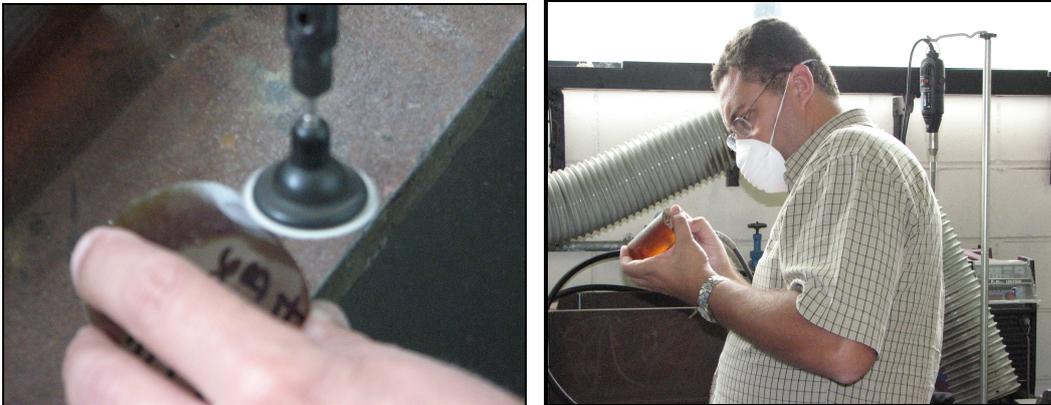


Figura 3.9 - Preparação inicial dos corpos-de-prova para que fosse ao torneamento.

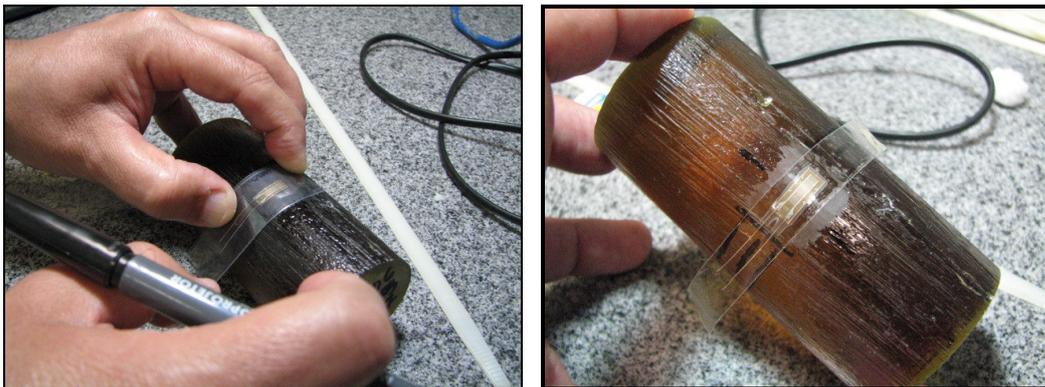


Figura 3.10 - Colagem do *strain gauge* na posição de medição de deformações circunferenciais.

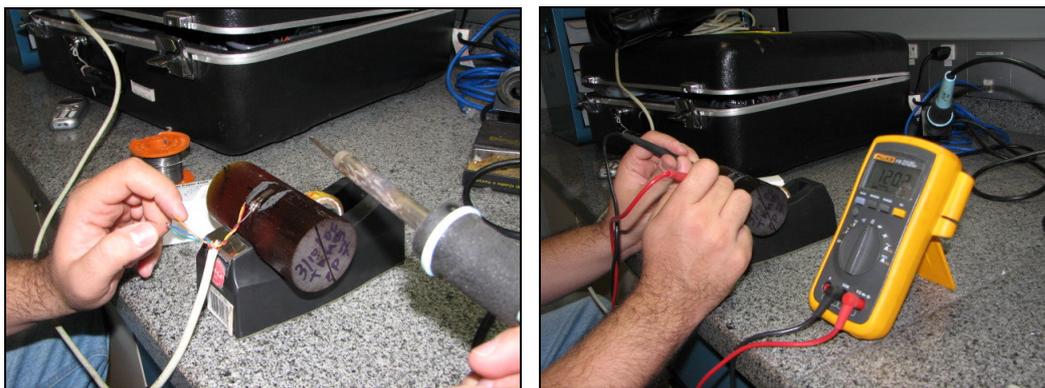


Figura 3.11 - Soldagem dos terminais elétricos ao *strain gauge*

As figuras abaixo exibem a montagem do corpo-de-prova na prensa e interligação ao sistema de medição MTS (medidas longitudinais), ao sistema dos *gauges* (medidas circunferenciais) e ao próprio sistema da prensa de registro de carga e deslocamentos.

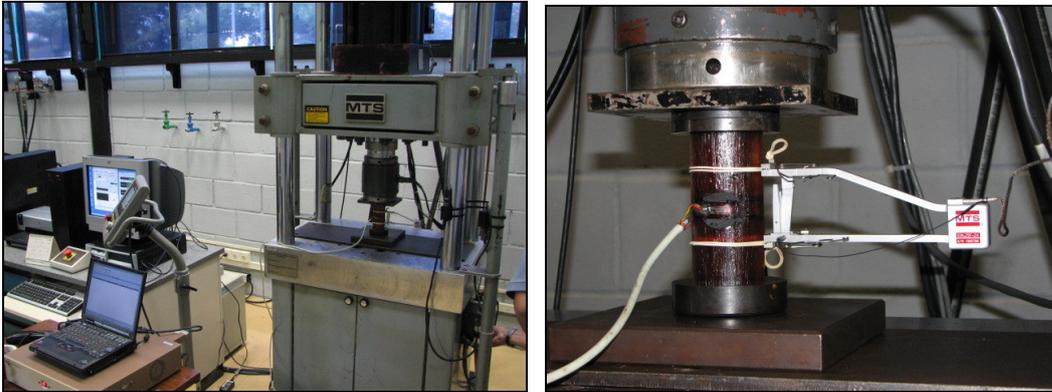


Figura 3.12 - Montagem do corpo-de-prova na prensa e interligação ao sistema de medição

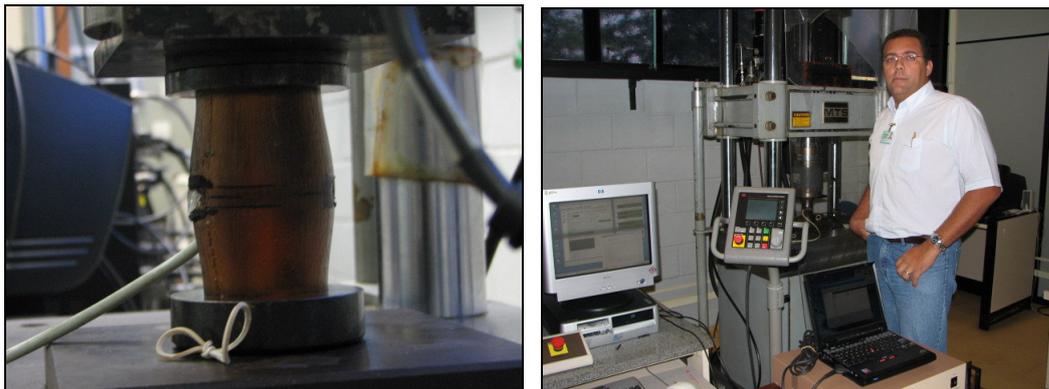


Figura 3.13 - Acompanhamento do ensaio



Figura 3.14 - Finalização do ensaio com o corpo-de-prova rompido



Figura 3.15 - Comparação entre um corpo-de-prova rompido após o ensaio de compressão e o outro que ainda seria ensaiado (corpos preparados à temperatura de 70°C).



Figura 3.16 - Mesma comparação para corpos preparados à temperatura ambiente.

3.3.2 Metodologia para encontrar os resultados dos ensaios

Após as instrumentações cada corpo-de-prova cilíndrico foi batizado para o acompanhamento dos ensaios de compressão conforme a tabela abaixo:

NOME	SERIE	MATERIAL	Temperatura de cura (°C)	Data do ensaio
CP01	B	Resina	70	04-dez-06
CP02	B	Resina	70	11-dez-06
CP04	A	Resina	22 (ambiente)	11-dez-06
CP05	A	Resina	22 (ambiente)	08-dez-06
CP06	A	Resina	22 (ambiente)	11-dez-06
CP07	C	Resina + cimento	22 (ambiente)	04-dez-06
CP09	C	Resina + cimento	22 (ambiente)	04-dez-06

Tabela 3.4 – Identificação dos corpos-de-prova ensaiados

A tabela 3.5 mostra um exemplo dos registros do arquivo de saída do sistema MTS referente ao corpo-de-prova CP06. Nessa tabela foram colocados os valores de Módulo de Elasticidade Médio e Máximo lido na curva do corpo-de-prova e calculado o módulo de elasticidade de cisalhamento (G).

Os valores das colunas POISON 6 e POISON 7 foram obtidos pela razão entre os valores registrados nos strain gauges (mm/mm#6 e mm/mm#7) pelo valor obtido no Extensômetro. Para cada tempo registrado foi gerado uma média entre os valores de Poison6 e Poison7. O valor final do coeficiente de Poisson foi gerado pela média das médias calculadas.

Time Sec.	TENSÃO MPa	100032,07 FORÇA(N)	EXTENSOM. mm/mm	CANAL [6] Strain	CANAL [7] Strain	mm/mm#6	mm/mm#7
108,1	10,56890	20011,65	-0,00402917	1209	1724	0,00121	0,00172
116,0	13,14312	24885,78	-0,00501461	1583	2098	0,00158	0,00210
125,7	16,40371	31059,54	-0,00630471	2067	2634	0,00207	0,00263
132,9	18,85770	35706,03	-0,00729641	2452	3028	0,00245	0,00303

Tabela 3.5 - Amostra dos registros do arquivo de saída do sistema MTS.

		POISON	MOD			MIN	MED	MAX	G	
		0,40	ELASTIC				2468,926	2631,195	2057,439	
POISON	POISON	MEDIA	ELASTIC	DIF	L0	D0	AREA	PI		
6	7									
-0,30	-0,43	-0,36	2623,094	-515	101,61	49,10	1893,446	3,141593		
-0,32	-0,42	-0,37	2620,964	-515	0					
-0,33	-0,42	-0,37	2601,818	-567	0					
-0,34	-0,41	-0,38	2584,516	-576	0					

Tabela 3.5A - Amostra dos demais registros do arquivo de saída do sistema MTS.

Com as tabelas finalizadas foram gerados seus respectivos gráficos das curvas CARGA x TEMPO de todos os corpos-de-prova ensaiados para demonstrar todo o comportamento desde a fase elástica até o rompimento final. Conforme observado no programa experimental (Alves, 1995) o serrilhado da curva refletem as rupturas internas do corpo-de-prova.

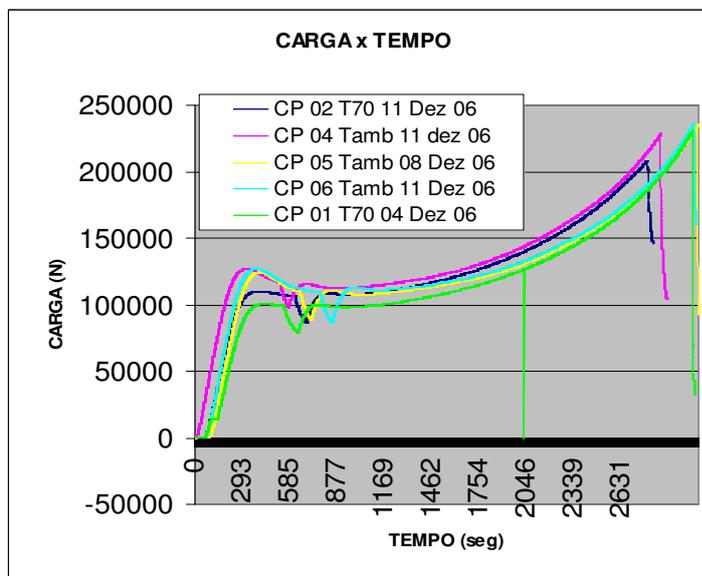


Figura 3.17 -Curvas CARGA x TEMPO de todos os corpos-de-prova.

No detalhe a seguir é mostrada desde a zona elástica até o limite de escoamento. Foi observada que as curvas para o material aquecido a 70°C teve seu limite de resistência reduzido. A curva do CP06 foi considerada a mais representativa dentre as demais corpos-de-prova que utilizaram Resina como material do anular.

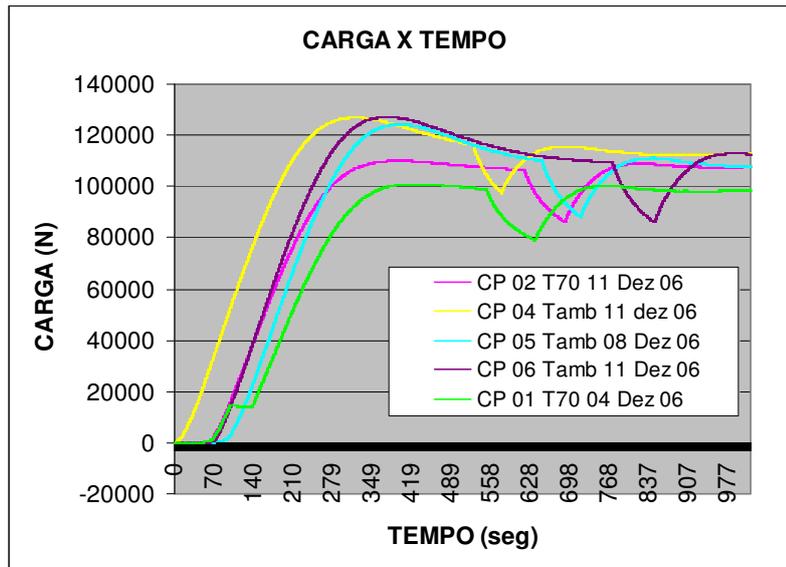


Figura 3.18 - Detalhe da ilustração anterior mostrando a zona elástica até o limite de escoamento.

Foi realizada uma comparação das curvas de dados registrados nos *strain gauges* demarcando junto a uma das curvas do ensaio, como exemplo, e os tempos em que cada *strain gauge* perdeu a leitura (perda de adesão do cianoacrilato).

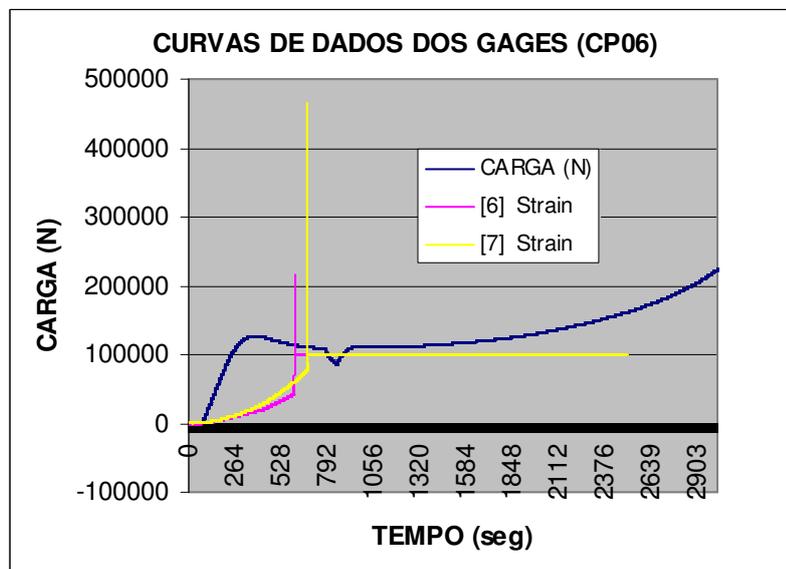


Figura 3.19 - Comparação das curvas de dados registrados nos *strain gauges*

O detalhe da ilustração anterior mostra a evolução dos registros dos *gauges* em seus respectivos canais, e exibe também a localização do Módulo de Elasticidade Médio (A) 2485,04MPa e o limite de escoamento (B) 67.26 MPa.

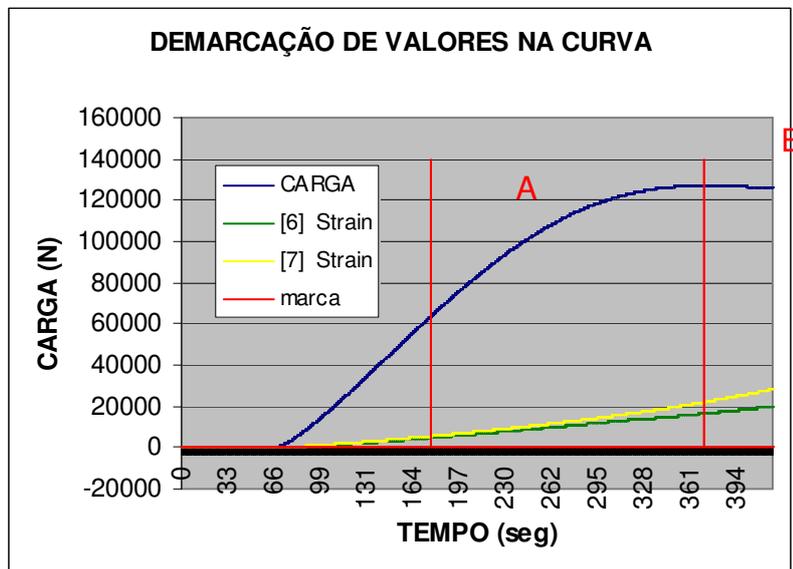


Figura 3.20 – Detalhe da ilustração anterior com o Módulo de Elasticidade Médio (A) 2485,04MPa e o limite de escoamento (B) 67.26 MPa.

Como visto anteriormente, o valor do Coeficiente de Poisson foi calculado como a média da razão entre as deformações axiais medidas com o extensômetro e as deformações circunferenciais medidas com os *strain gauges* durante o trecho do comportamento linear elástico. A figura 3.21 do CP03 onde é mostrada a evolução do cálculo do Coeficiente de Poisson utilizando cada *strain gauge* diferente POISON6 (*gauge* no canal 6) e POISON7 (*gauge* no canal 7). Não foram levados em conta os ruídos do início do ensaio observou-se que o coeficiente teve seu valor, para esse exemplo, em torno de 0,4.

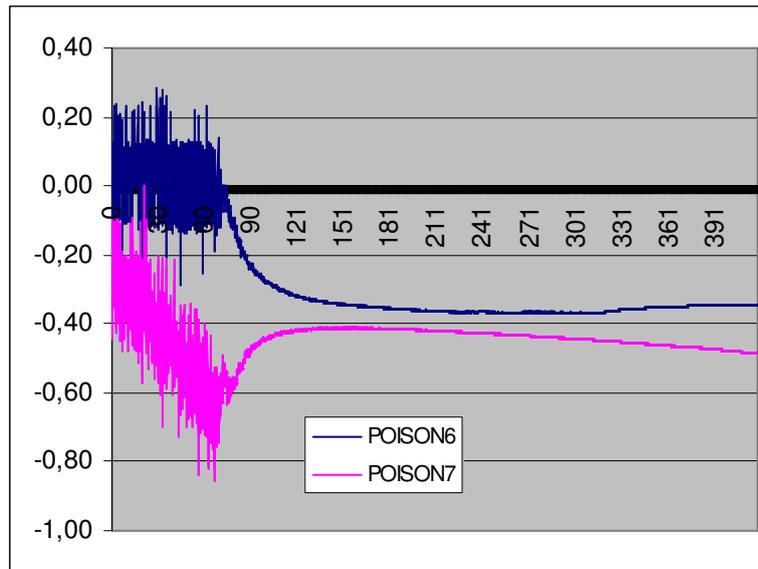


Figura 3.21 – Ilustração da evolução do cálculo do Coeficiente de Poisson

Foram gerados os diagramas de todos os corpos-de-prova onde foi visto que a o limite de resistência para as amostras da série B, apesar do produto estar a 70°C, ficou abaixo dos da série A e C que estão bem próximas e a parte da resina que estaria sendo curada a essa temperatura seria apenas a da interface com o tubo a ser reparado. Assim, a resina confinada não estaria sendo curada na mesma temperatura por igual tornando o valor de limite de resistência diferente do encontrado no laboratório.

3.3.3. Diagrama Tensão *versus* Deformação

Na seqüência foram levantados os diagramas de tensão *versus* deformação com os melhores resultados dos corpos-de-prova das séries A e C e os escolhidos foram o CP 06 e o CP 09. A escolha teve a razão de que ambos apresentaram o maior limite de resistência à compressão.

A figura 3.22 exibe o diagrama Tensão *versus* Deformação Axial onde são mostradas as curvas do CP-06 (resina) com o limite de resistência de 67,26 MPa e a do CP-09 (mistura) com limite o de 65,25 MPa.

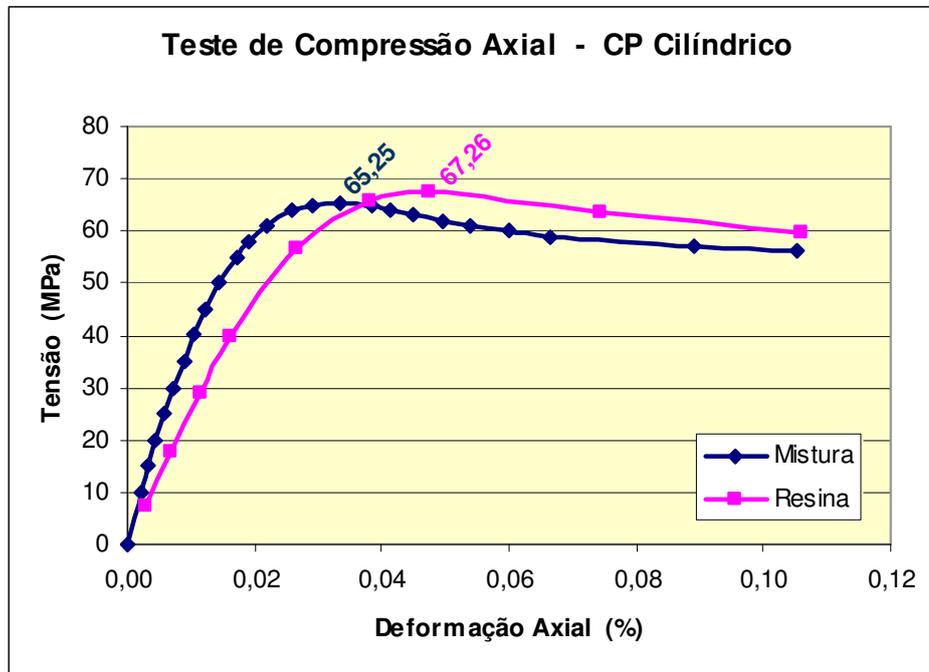


Figura 3.22 – Diagrama Tensão *versus* Deformação Axial do CP-06 e do CP-09.

Pelo diagrama os módulos de elasticidade mostram que o CP-09 (MISTURA) é mais rígido, contudo, os valores de limite de resistência estão próximos, o que indica que o cimento não contribui para a resistência à compressão da MISTURA e sim atua somente como elemento de carga, conforme mencionado por Alves, 1998.

Com as observações acima e a necessidade de comparação dos resultados com o programa experimental original, foi selecionada para dar seqüência a esse trabalho à curva da MISTURA (CP-09) cujos valores de propriedades do material são:

Propriedade	Valor
Resistência à compressão	65,25 MPa
Módulo de Elasticidade	4504 MPa
Coefficiente de Poisson	0,25

Tabela 3.6 – Propriedades da MISTURA (CP09) levantadas no laboratório