

## 4. Resultados Experimentais Considerados

### 4.1. Introdução

A resistência estática dessas conexões tem sido bastante pesquisada (Karsan, 1984), mas no que se refere ao comportamento e modo de falha das conexões, não há resultados experimentais disponíveis que possam respaldar um critério de dimensionamento adequado para essa conexão.

Devido a essa falta de dados experimentais para esse tipo de conexão, um programa experimental foi conduzido por Alves em 1995 e descrito no relatório Resistência de Aderência de Conexões “*Grouteadas*” com Resina Epóxi e Cimento. O objetivo principal desse programa experimental foi o estudo do comportamento de conexões de reparo ou reforço de membros tubulares *offshore*.

Os resultados obtidos durante cada teste foram:

- Deformações longitudinais e circunferenciais na luva - obtidas por meio de rosetas bi-axiais de *strain gauges* nas direções longitudinal e circunferencial colados na superfície externa da luva.

- Carga axial compressiva – medida no atuador servo-hidráulico de 500kN de capacidade.

- O deslocamento relativo entre os membros tubulares: interno (tubo) e externo (luva) - obtido por meio de um deflectômetro (relógio comparador), cuja exatidão era de 0,001 mm, para vários passos de carga selecionados.

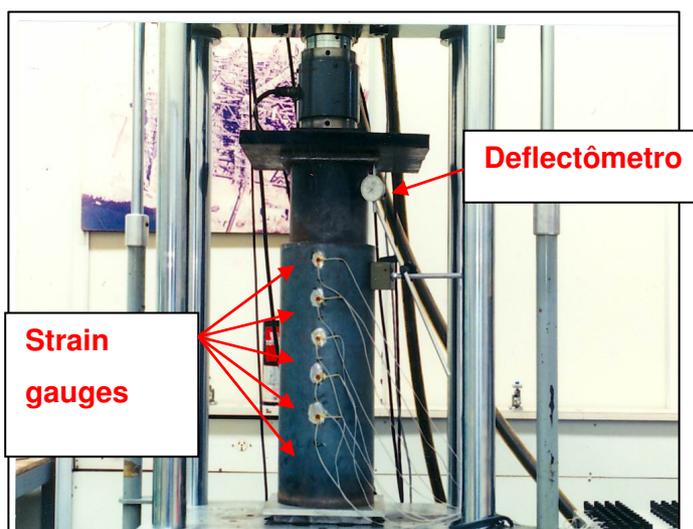


Figura 4.1 – Teste de conexão de reparo, Alves (1995). *strain gauges* colados em um lado da conexão

No programa experimental foram consideradas conexões com e sem *shear keys*, variação do espaçamento dos *shear keys* e diferentes espaços anulares. Entretanto, para o presente estudo, foram selecionados do programa experimental apenas dois tipos de conexões:

CONEXÃO A1	Lisa, isto é, sem <i>shear keys</i>
CONEXÃO A2	Com três <i>shear keys</i> , diâmetro igual a 4,7625 mm (3/16 polegadas) e espaçados de 165 mm. Os <i>shear keys</i> foram colocados somente no lado interno da luva pois a operação de reparo visa atender dutos sem qualquer estrutura na parede externa.

Tabela 4.1 – Descrição das conexões selecionadas no programa experimental de Alves.

A figura 4.2 apresenta a geometria típica da conexão de reparo considerada no programa experimental e a tabela 4.2 apresenta os parâmetros dos tubulares.

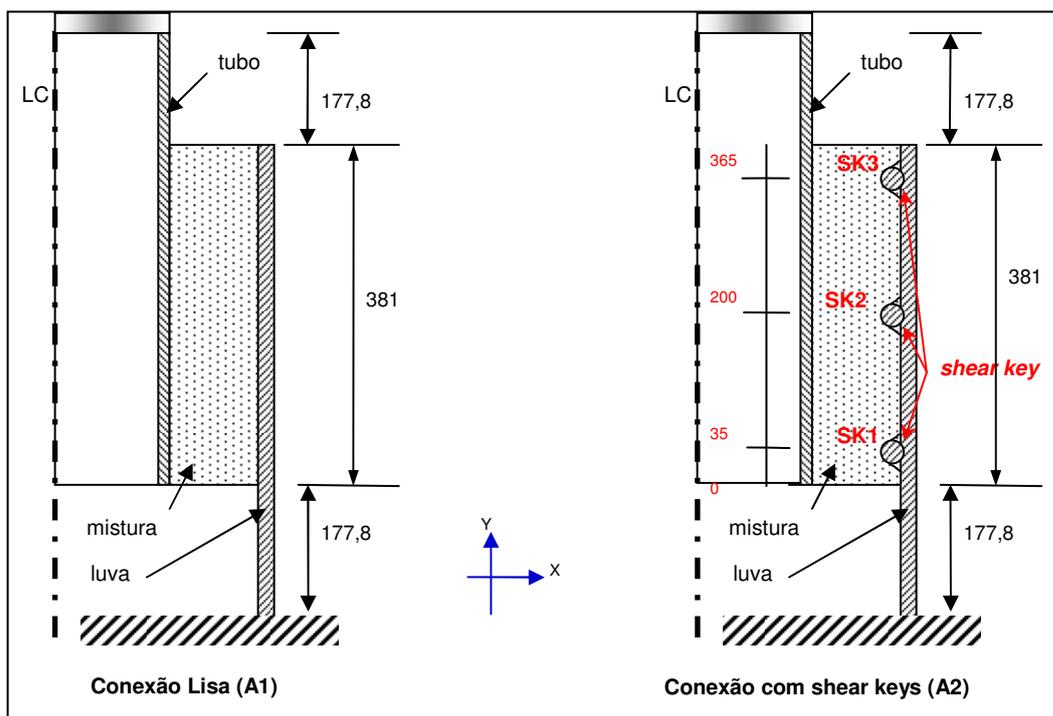


Figura 4.2 – Geometria típica considerada no programa experimental (Alves).

Característica dos componentes			tubo	mistura	luva
Parâmetro	Símbolo	Unidade	(interno)	(anular)	(externo)
Diâmetro externo	D	mm	190,5	223,5	229,87
Espessura de parede	t	mm	3,175	16,51	3,175
Área seção transversal	A	mm <sup>2</sup>	1868,48	-	2216,18
Comprimento	L	mm	558,8	381,0	558,8
Módulo de Elasticidade (X60)	E	MPa	206500	3600	206500
Poisson	$\nu$	-	0,3	0,21	0,3
Material	-	-	Aço estrutural não especificado	Cimento + Epóxi	Aço estrutural não especificado

Tabela 4.2 – Parâmetros geométricos e propriedades consideradas no programa experimental (Alves).

O objetivo dos *shear keys* foi o de se aumentar a resistência de aderência das conexões. Os *shear keys* foram soldados apenas na superfície interna da luva para simular o caso de reparo ou reforço de membros estruturais submersos, quando se torna impossível à soldagem dos *shear keys* no duto avariado.

Os membros tubulares foram dispostos concêntricamente sobre uma caixa de madeira de modo que seus comprimentos ficassem defasados de 381 mm. No espaço anular entre o tubo e a luva foi injetada a mistura de resina epóxi e cimento.

A mistura contou com resina epóxi e cimento dosados em partes por peso e a curada por 21 dias, oferecendo resistência à compressão de 39,7 MPa em corpos-de-prova cúbicos. A mistura foi preparada em batedeira destinada à preparação de pasta de cimento, colocando-se inicialmente a resina epóxi, em seguida o cimento e posteriormente os endurecedores.

## 4.2. Resultados do Programa Experimental

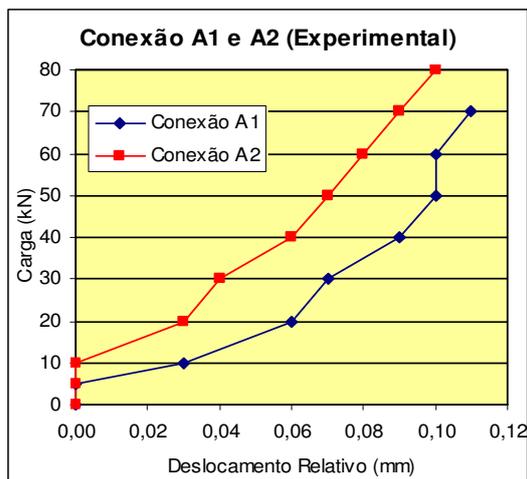
### 4.2.1. Deslocamento Relativo

Os resultados consistiram de registros de carga sob o qual ocorreu o deslocamento relativo <sup>(1)</sup>, desde o início do teste até a falha. A falha ocorreu quando a conexão não foi capaz de resistir a qualquer carregamento adicional.

(1) Deslocamento relativo: é o deslocamento entre os membros tubulares, interno (tubo) e externo (luva), obtido por meio de relógio comparador para vários passos de carga selecionados.

CONEXAO	Carga sob a qual se iniciou o eslocamento relativo	Carga máxima suportada pela conexão
A1	5,0 kN	95,0 kN
A2	10,0 kN	320,0 kN

Tabela 4.3 – Cargas registradas no início dos deslocamentos relativos e cargas máximas suportadas pelas conexões A1 e A2 (Programa experimental de Alves)



Carga (kN)	Conexão A1	Conexão A2
5	0,00	0,00
10	0,03	0,00
20	0,06	0,03
30	0,07	0,04
40	0,09	0,06
50	0,10	0,07
60	0,10	0,08
70	0,11	0,09
80	-	0,10

Figura 4.3 – Diagrama carga - deslocamento relativo das conexões A1 e A2

Conforme indicado na tabela 4.3 e na figura 4.3, onde somente são apresentados resultados até a carga de 80 kN, o deslocamento relativo da conexão A1 iniciou-se sob carga de 5 kN. A falha ocorreu sob a carga de 95 kN seguida de queda brusca do carregamento. O deflectômetro foi retirado após a carga de 70 kN.

O deslocamento relativo da conexão A2 iniciou-se sob a carga de 10 kN. A evolução da curva de deslocamento relativo *versus* carga aplicada foi variável até 40 kN. A partir desta carga, manteve-se praticamente constante, até a carga de 180 kN, quando o deflectômetro foi retirado. A ruptura ocorreu, precedida de grande estrondo, sob a carga de 320 kN.

#### 4.2.2. Deformações Longitudinais e Circunferenciais

As deformações longitudinais e circunferenciais foram obtidas nos pontos instrumentados com rosetas bi-axiais de *strain gauges*, sendo que o posicionamento do primeiro (ST1) em relação à base do tubo foi de 40 mm e do

último (ST5) em relação ao topo do tubo foi de 11mm. A distância entre as rosetas (ST1 à ST4) foi constante e igual a 80 mm (conforme Figura 4.4).

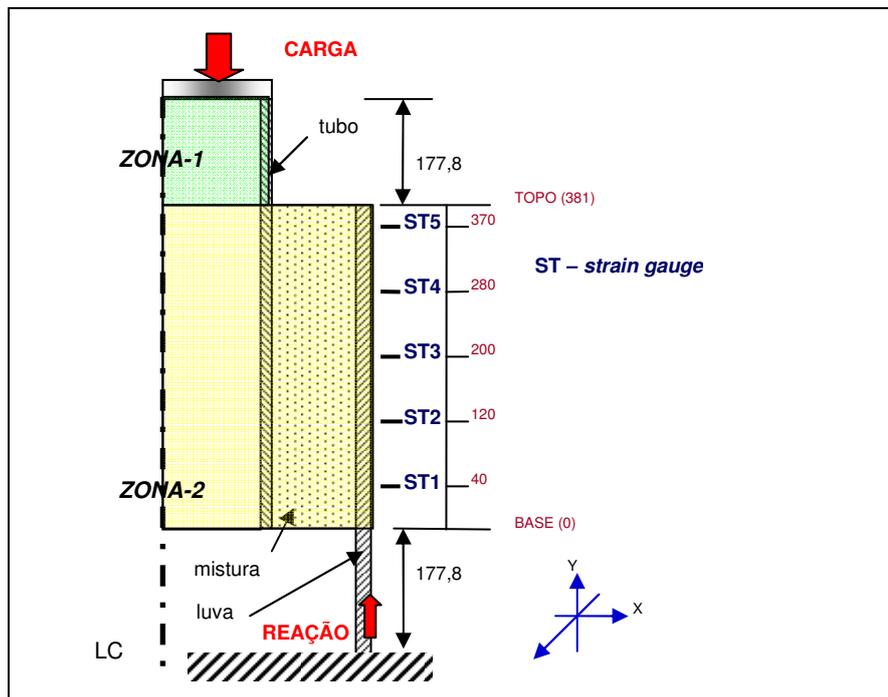


Figura 4.4 – Esquema do posicionamento das rosetas *strain gauges* coladas na superfície externa da luva.

O resultado da distribuição das deformações longitudinais e circunferenciais, medidas nos locais indicados na figura 4.4, para carregamentos selecionados, estão indicadas nas figuras 4.5 e 4.6:

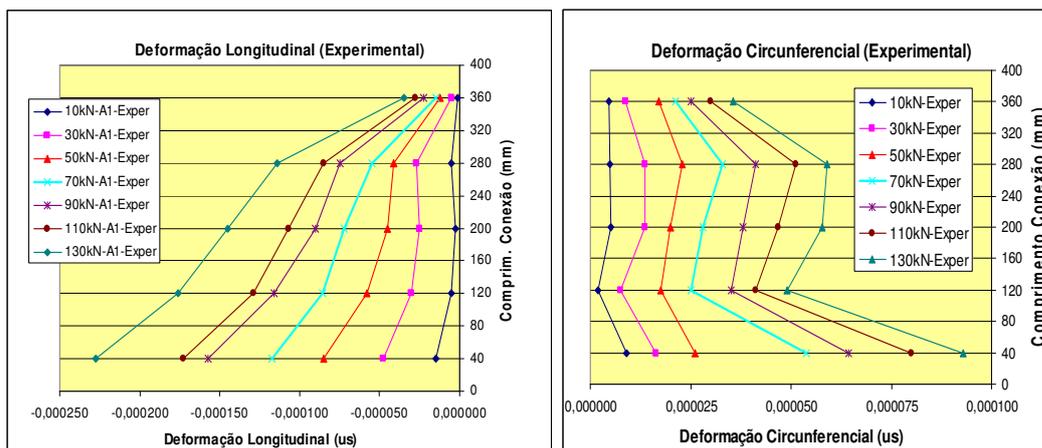


Figura 4.5 – Diagrama deformação longitudinal *versus* comprimento da conexão e Diagrama deformação circunferencial *versus* comprimento da conexão da conexão lisa (A1)

Na figura 4.5, referente à conexão A1, observa-se que foram registradas deformações até 130 kN, mesmo tendo a ruptura ocorrida sob 95 kN com queda brusca do carregamento.

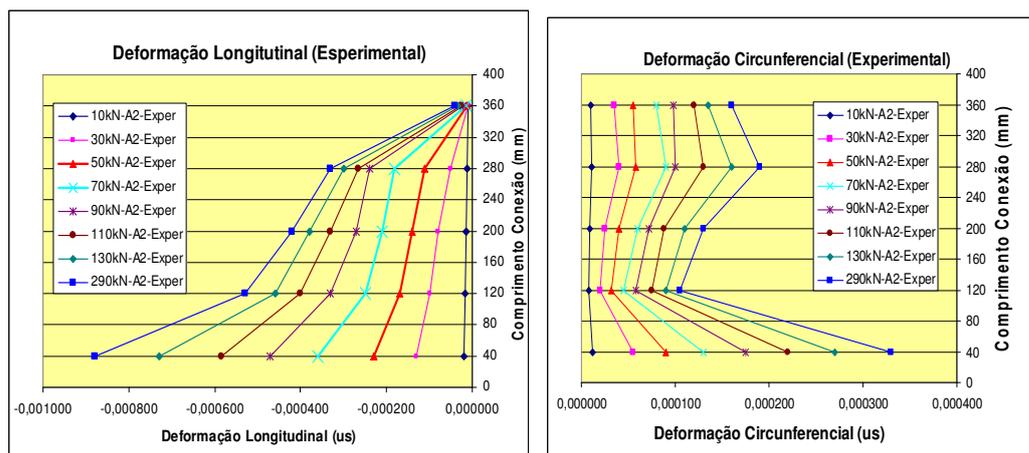


Figura 4.6 – Diagrama deformação longitudinal *versus* comprimento da conexão e Diagrama deformação circunferencial *versus* comprimento da conexão da conexão com *shear key* (A2)

Pôde ser observado nas figuras 4.5 e 4.6 que a diferença na magnitude das deformações refletiu a diferença significativa na carga última. Para as mesmas cargas aplicadas os diagramas exibiram deformações maiores para a conexão A2 (com *shear keys*).

As mudanças no perfil das deformações foram associadas à redistribuição de esforços através da mistura de resina epóxi e cimento, que encontrou ancoragem maior na conexão com *shear key*, evitando o escorregamento prematuro.

### 4.3. Análise dos Resultados do Programa Experimental (Alves)

#### - Deslocamentos Relativos

Nesse trabalho realizou-se uma análise comparativa dos deslocamentos relativos obtidos para as conexões A1 e A2 do programa experimental de Alves. A análise consistiu em se deslocar a curva carga *versus* deslocamento relativo da conexão lisa A1 sobre a curva da conexão com *shear keys* A2. Pode ser observado que carga-deslocamento relativo referente às duas conexões tiveram comportamento iniciais semelhantes até 50 kN. As conexões tinham as mesmas características geométricas e as mesmas propriedades mecânicas. Portanto, até a carga de 50kN, observa-se a independência da presença dos *shear keys*.

Na seqüência, foram determinados os valores da rigidez das conexões através da razão entre o acréscimo de deslocamento e o acréscimo de carga. Os resultados gerados mostram que as curvas possuem pontos com os valores de

rigidez iguais e alguns pontos com valores de rigidez divergentes, como no início do carregamento e na carga de 60 kN.

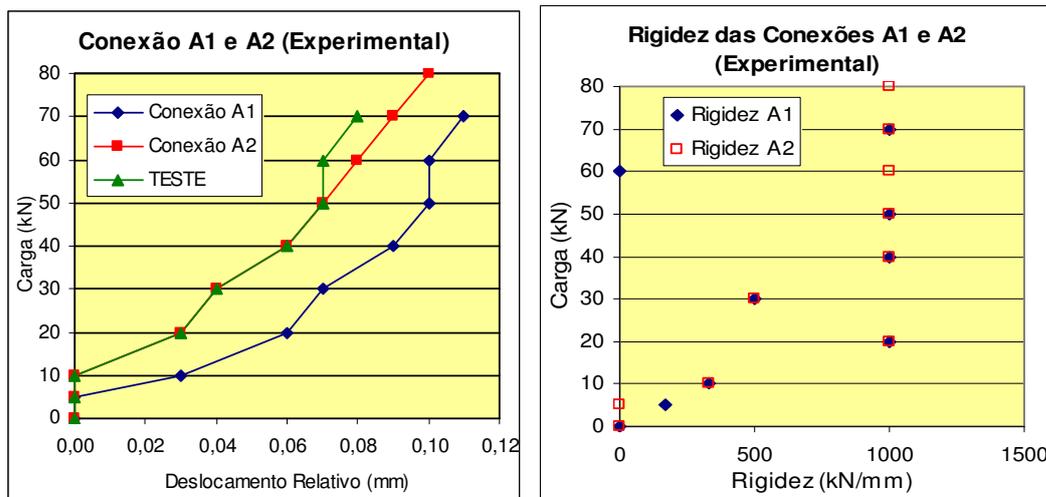


Figura 4.7 – Diagrama com a comparação entre as curvas do deslocamento relativo versus carga das conexões A1 e A2 do programa experimental e o diagrama de rigidez versus carga.

Uma hipótese de justificativa da divergência é a dificuldade de registro do deslocamento devido à exatidão do defletoômetro usado no programa experimental (0,001 mm), o que dificulta o registro preciso do defletoômetro com a variação contínua da carga, principalmente no início do teste, entre as cargas de 0 a 10kN, quando ocorreram os primeiros deslocamentos. Pelo posicionamento do defletoômetro, mostrado na Figura 4.1, o deslocamento relativo medido levou em consideração a deformação do tubo, da mistura e de pequena parte da luva, onde ocorre na realidade.

#### - Deformações Longitudinais

As deformações longitudinais registradas tanto na luva da conexão lisa (A1), quanto na luva da conexão com *shear keys* (A2) foram geradas pela força de reação como indicado na Figura 4.4. Como pode ser observado na Figura 4.8, as curvas indicam que as deformações no topo das conexões foram pequenas e crescentes com o aumento da carga. A variação das deformações ao longo do comprimento da luva foi crescente e na sua base as deformações foram maiores do que as do topo.

### - Deformações Circunferenciais

As deformações circunferenciais na conexão com *shear keys* (A2), foram maiores que na conexão lisa (A1). As deformações na base da luva foram muito maiores do que no topo da mesma. As hipóteses que podem justificar esses resultados são:

a) perda de aderência entre a mistura e a luva no trecho da base da conexão ao primeiro *strain gauge* (ST-1).

b) comportamento da mistura à tração é desconhecido que possa permitir a aderência, porém elástica o suficiente para que ocorra deformação na luva.

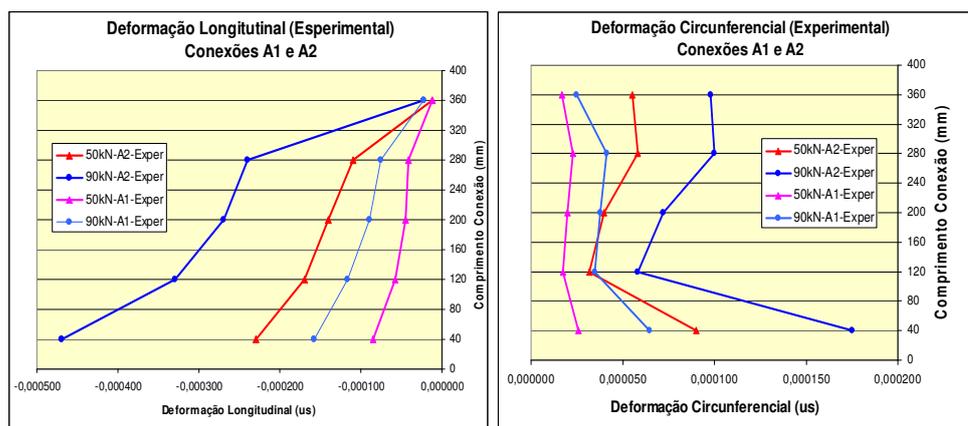


Figura 4.8 – Comparação entre as curvas dos diagramas deformação longitudinal e circunferencial *versus* comprimento da conexão, referentes às conexões A1 e A2.

### - Mistura de Resina Epóxi e Cimento

Com base nos dados reportados no programa experimental (Alves, 1995) e na última observação do item anterior, foi refeita a mistura de cimento e resina epóxi, visando comparação com os valores reportados por Alves, tais parâmetros são:

- Módulo de Elasticidade;
- Coeficiente de Poisson;
- Contribuição do cimento na resistência à compressão da mistura
- Curva tensão *versus* deformação

Todo o processo de confecção da mistura, preparação dos corpos-de-prova e ensaios destrutivos está descrito no Capítulo 3.

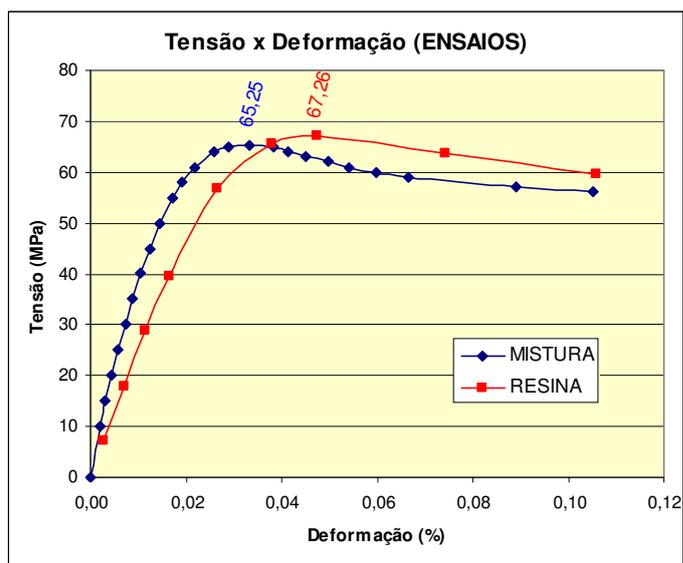


Figura 3.22 (reproduzida) – Diagrama tensão *versus* deformação resultante do ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos de resina epóxi e da mistura de resina epóxi e cimento Alves (1995).

Conforme já descrito, a curva selecionada foi a da mistura para que fosse possível fazer as comparações com o programa experimental de Alves, 1995.