

6. Modelagem Numérica da Conexão de Reparo sem Shear Keys – A1

6.1 Introdução

Com a finalidade de otimização das análises do comportamento da conexão de reparo, incluindo à falha da mesma, foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação.

A modelagem pelos elementos finitos se inicia pela discretização em um número finito de elementos. Esta discretização permite a resolução de problemas impondo um sistema de equações, que é aplicável às estruturas por mais complexas que sejam, mediante a um grande número de operações de natureza repetitiva que podem ser adaptadas a uma programação numérica para ser resolvida por um computador.

Para cada elemento obtido da discretização é aplicada uma matriz de rigidez que relaciona as forças com as deformações. Em geral, dado que o método de cálculo mediante elementos finitos é um procedimento aproximado, a precisão requerida aumenta com o número de elementos usados.

As cargas aplicadas à estrutura são substituídas por um sistema de forças equivalentes concentradas nos nós para manter a estrutura em equilíbrio. As aplicações numéricas desse método vão desde análises lineares até as não-lineares. Essas últimas são usadas para se estudar problemas com ocorrência de escoamento ou escorregamento entre os corpos modelados.

Conforme observado no Programa Experimental de Alves 1995 a falha observada da conexão não se deve ao escoamento do material, mas sim do escorregamento entre os componentes da conexão, ou seja, a conexão falha por perda de aderência entre as interfaces tubo/mistura e mistura/luva.

Neste trabalho foi utilizado o programa de computador comercial Ansys 10.0. Os modelos foram analisados até a ocorrência de falha necessitando para isso de rotinas computacionais de cálculos não lineares devido às propriedades inerentes dos elementos de contacto que permitem a ocorrência de escorregamento.

6.2 Conexão Sem Elemento de Contacto (A1-SEC)

Para a conexão lisa (A1), foi elaborado um modelo numérico com as condições de contorno da conexão A1 considerada no Programa Experimental de Alves simulando a aderência perfeita (A1-SEC). Esse modelo foi constituído para se conhecer o modo de falha da conexão, ou seja, se ocorre a falha na mistura ou na interface da mistura com o tubo ou com a luva. Outra informação obtida a partir desse modelo é a comparação com os valores de rigidez axial obtida a partir de formulação indicada no capítulo anterior e comparados seus resultados com os do modelo analítico e do Programa Experimental de Alves.

Para simular a aderência perfeita entre os membros tubulares, foi usado um método de controle numérico do programa Ansys 10.0 que processa a coincidência dos nós das malhas, entre os diferentes elementos. Esse artifício do programa une os nós muito próximos entre os elementos diferentes, em um único nó criando uma ligação rígida que não permite deslizamentos ou ruptura das ligações nas interfaces desses elementos (membros tubulares).

6.2.1 Características da Modelagem

O modelo numérico foi elaborado dentro do programa Ansys 10.0 com todas as condições de contorno e propriedades dos materiais (isotrópico linear - módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do aço e da mistura) e (Isotópicos multilineares – valores da curva tensão *versus* deformação da mistura que foram obtidos conforme indicado no Capítulo 3). Com esses parâmetros o programa pode gerar resultados de análises lineares ou não-lineares. Os modelos foram concebidos com as seguintes características:

a) Os modelos reproduziram a geometria e as propriedades mecânicas da conexão lisa (A1) e da conexão com *shear keys* (A2). As propriedades mecânicas do material da mistura (resina e cimento) foram consideradas conforme o Capítulo 3.

b) Os parâmetros dos materiais utilizados nos modelos estão indicados na tabela 6.1.

Material	Aço (tubo e luva)	mistura
Módulo de Elasticidade (E)	$2,065 \times 10^5$ MPa	4504 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	0,25

Tabela 6.1 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem com elemento de contacto

c) Os modelos elaborados foram axissimétricos e procurou-se adotar uma discretização que não interferisse na convergência e que também não tivesse um custo computacional elevado. As condições de contorno foram semelhantes às dos espécimes considerados no Programa Experimental de Alves e da modelagem analítica. A modelagem axissimétrica previu que o tubo se movimentaria concêntrico à luva, pois no programa experimental não é mencionado qualquer tipo de desalinhamento entre os membros tubulares ou qualquer instrumentação que pudesse mensurar possíveis desalinhamentos;

d) Foi selecionado para o aço (tubo e luva) e para a mistura o elemento *PLANE42 (2D Structural Solid)*, o qual é empregado em modelagem 2D de estruturas sólidas. Tal elemento pode ser usado como um elemento plano (tensões planas ou deformações planas) ou como um elemento axissimétrico. O elemento é definido por quatro nós e dois graus de liberdade em cada nó: translação nas direções X e Y. Foi construída malha uniforme, com razão de aspecto igual a 1.

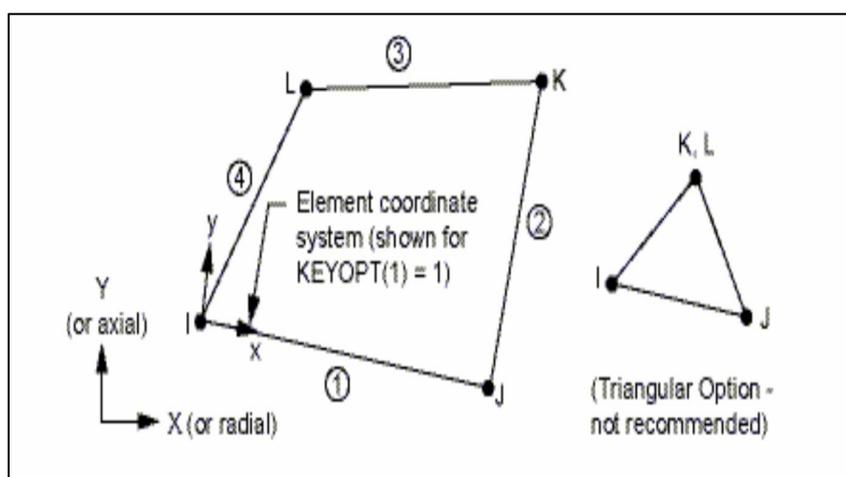


Figura 6.1 – Geometria do elemento PLANE42

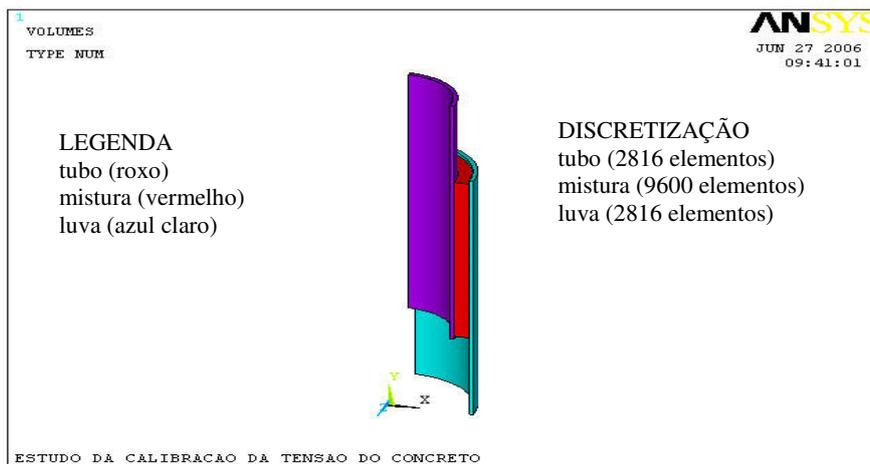


Figura 6.2 – Visão 3D de seção de ¼ da conexão

e) No modelo numérico (A1-SEC) foi aplicada um carregamento até 500 kN com incrementos de carga de 5 kN.

6.2.2 Comparação dos Resultados Numéricos com os Experimentais

Os deslocamentos relativos fornecidos pelo modelo A1-SEC foram obtidos considerando-se para medição dos deslocamentos a distância entre o topo do tubo na ZONA-1 e um ponto estimado da posição do deflectômetro na luva, na ZONA-2, conforme feito no modelo Analítico E e ilustrada pela figura 5.8.

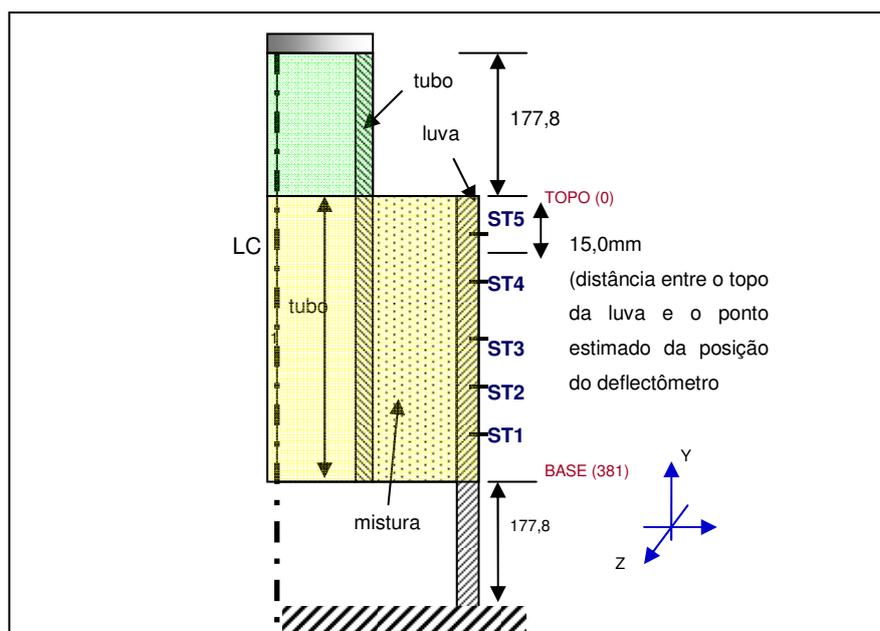


Figura 6.3 – Desenho esquemático da distância coberta pelo relógio comparador (deflectômetro) para o modelo Analítico E, conforme a figura 4.2.

Os calibres da posição estimada do deflectômetro na luva do modelo A1-SEC se fizeram necessários para que os mesmos parâmetros de geometria usados no modelo analítico E fossem reproduzidos e assim tornar possível as comparações dos resultados de deslocamento relativo e rigidez axial do modelo numérico com os do modelo analítico e também com os resultados do modelo do Programa Experimental de Alves.

a. Diagrama Carga *versus* Deslocamento Relativo

Na tabela 6.2 estão mostrados os valores de deslocamento relativo coletados no relatório do Programa Experimental de Alves, os resultados gerados pelo modelo Analítico E e os resultados do modelo numérico sem elemento de contato, ou seja, modelo simulando a aderência perfeita entre os tubos de aço e o anular de resina Epóxi.

Deslocamentos Relativos do Programa Experimental, do Modelo Analítico e do Modelo Numérico Sem Elemento de Contato (A1-SEC)			
Carga (kN)	Conexão A1 (Lisa) Experimental	Modelo Analítico E	Modelo A1-SEC
5	0,00	0,005054	0,003105
10	0,03	0,010108	0,006209
20	0,06	0,020216	0,012418
30	0,07	0,030324	0,018627
40	0,09	0,040432	0,024836
50	0,10	0,050539	0,031045
60	0,10	0,060647	0,037254
70	0,11	0,070755	0,043464

Tabela 6.2 – Deslocamentos relativos da conexão A1 relatados no Programa Experimental de Alves e os resultados gerados pelo modelo analítico e pelo modelo numérico sem elemento de contacto (SEC).

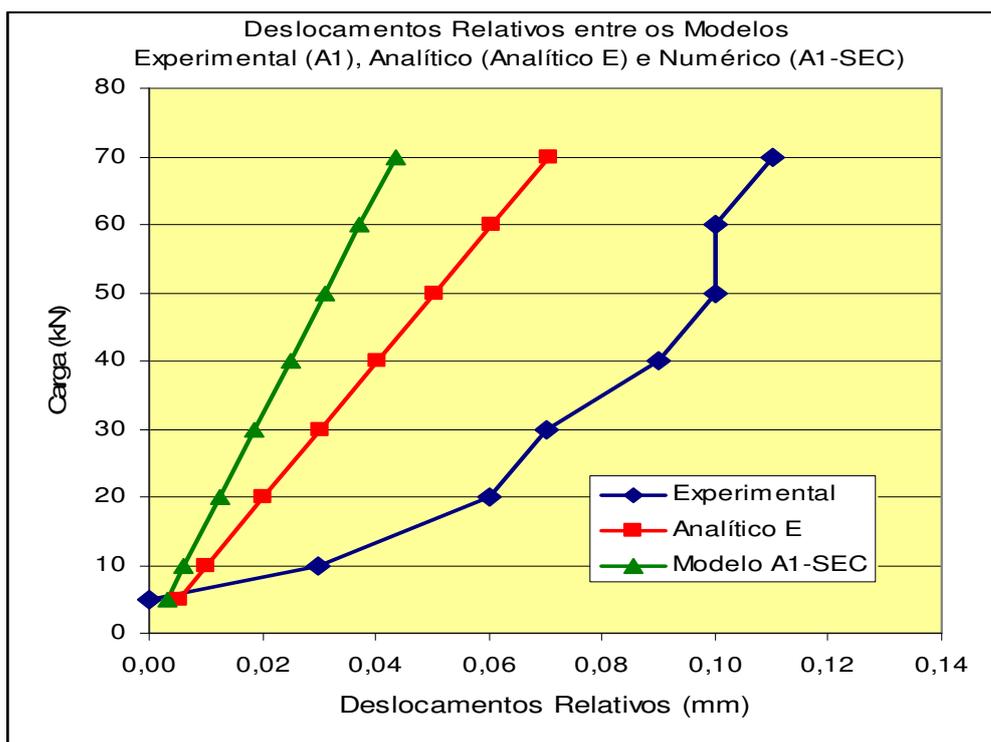


Figura 6.4 – Diagrama dos deslocamentos relativos do Programa Experimental de Alves, dos resultados do modelo analítico e dos resultados do modelo numérico sem elemento de contacto (A1-SEC).

Os resultados exibidos na figura 6.4 mostraram que o modelo A1-SEC é mais rígido que os resultados preditos no modelo Analítico-E e os relatados no Programa Experimental de Alves.

b. Diagrama Carga *versus* Rigidez Axial

Quanto a rigidez axial, foi calculada pela fórmula 5.16 e comparada com o resultado calculado para o modelo experimental de Alves e para o modelo analítico. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 6.3.

Rigidezes Axiais Calculadas dos Modelos do Programa Experimentais, do Modelo Analítico e do Modelo Numérico sem elemento de contato (A1-SEC)			
Variação da Carga (kN)	Conexão A1 (LISA) Experimental	Modelo Analítico E	Modelo A1-SEC
5	166,6667	989,3154	1610,825
10	333,3333	989,3154	1610,565
10	1000,0000	989,3154	1610,565
10	500,0000	989,3154	1610,565
10	1000,0000	989,4133	1610,565
10	0,0000	989,3154	1610,565
10	1000,0000	989,3154	1610,306
-70	636,3636	989,3294	1610,528

Tabela 6.3 – Rigidezes Axiais calculadas do modelo do Programa Experimental de Alves, do modelo analítico e modelo numérico sem elemento de contacto (SEC).

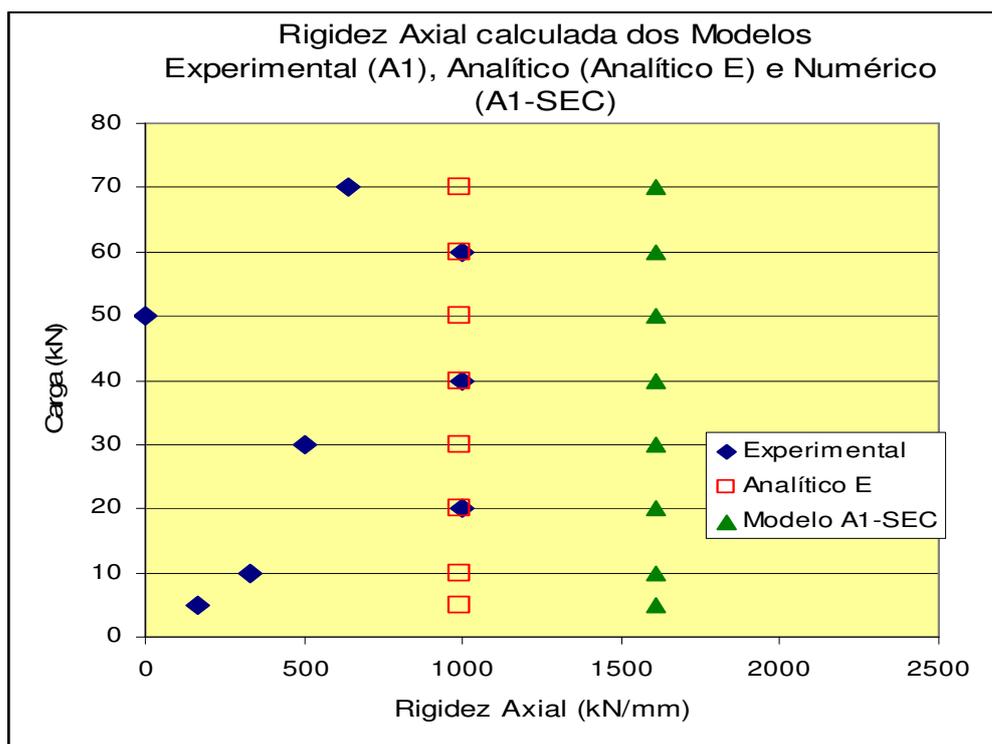


Figura 6.5 – Diagrama das rigidezes axiais calculadas do Programa Experimental de Alves, do modelo analítico e do modelo numérico sem elemento de contacto (A1-SEC).

Os resultados de rigidezes axiais calculadas, mostradas na figura 6.5, confirmaram que o modelo A1-SEC é mais rígido que os demais dados de comparação.

c. Diagrama Comprimento da Conexão *versus* Deformações

Foi executada uma comparação entre os resultados obtidos de deformação Longitudinal e Circunferencial entre o modelo numérico (A1-SEC) e os do Programa Experimental. Como mencionado no item 4.2.2 a face externa da luva foi instrumentada com cinco *strain gauges* que foram dispostos conforme o esquema abaixo:

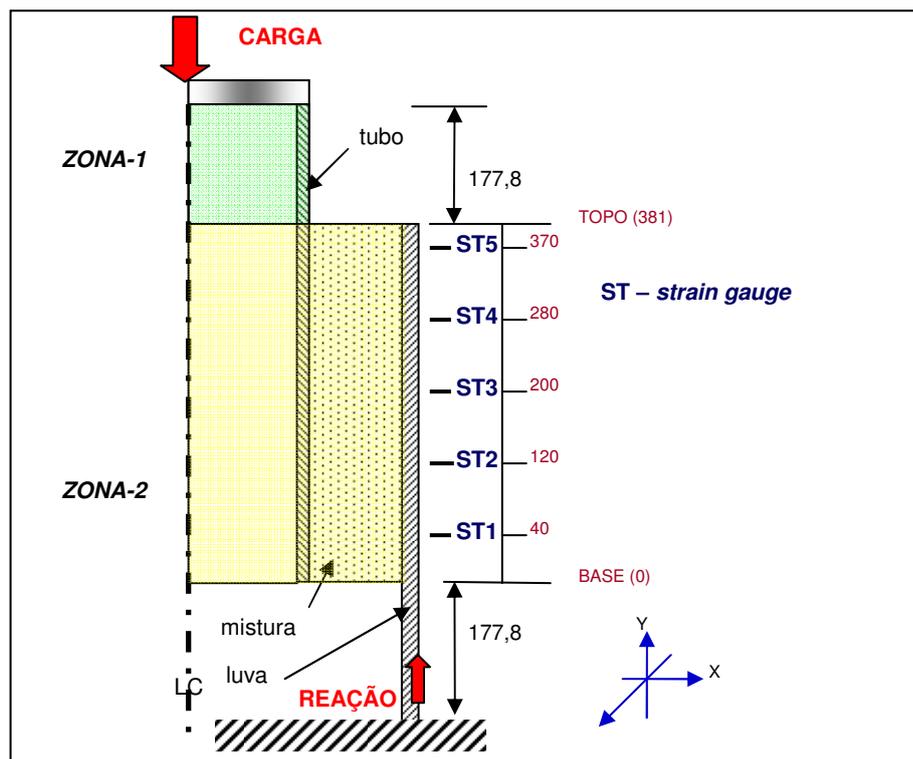


Figura 4.4 (Reproduzida) – Desenho esquemático do posicionamento dos *strain gauges* colados na superfície externa da luva.

De posse dos resultados das leituras realizadas nos *strain gauges* do Programa Experimental de Alves foi feita uma comparação com os valores de deformação lidos nos nós do modelo estudado. Os nós foram selecionados buscando a proximidade da posição descrita no Programa Experimental. Para melhor visualização da comparação de resultados, os diagramas foram limitados a apenas três cargas (10, 50 e 90 kN), sendo que a carga de 90 kN foi a escolhida por ser mais próxima da carga de ruptura da conexão segundo o Programa Experimental de Alves.

As comparações estão exibidas nas tabelas 6.4 e 6.5 seguidas pelos diagramas correspondentes.

- Diagrama deformação longitudinal: Apesar da aproximação dos resultados do programa experimental, as deformações captadas nos nós próximos à posição do *strain gauge* do topo da conexão (ST-5, na posição 360) foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves,. Essa indicação pode ser decorrente de rigidez que a luva apresenta aos carregamentos cisalhantes longitudinais, há a tendência ao deslizamento entre a mistura e a parede interna da luva (falha na interface). O deslizamento não ocorre pois o modelo considera a aderência perfeita sem elemento de contato.

A tabela 6.4 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.6 mostra os perfis de entre os resultados para comparação.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-SEC)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
370	-0,000002	-0,000012	-0,000023	0,000000	-0,000001	-0,000003
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000009	-0,000046	-0,000082
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000011	-0,000055	-0,000098
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000012	-0,000061	-0,000110
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000017	-0,000086	-0,000155

Tabela 6.4 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-SEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

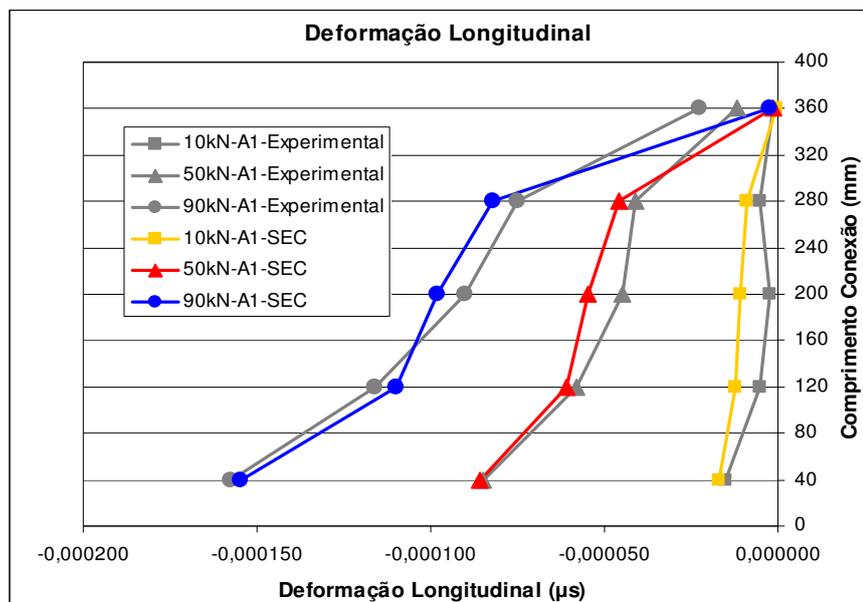


Figura 6.6 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-SEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

- Diagrama deformação circunferencial: O modelo numérico (A1-SEC) apresentou também uma aproximação dos resultados do programa experimental, mas de modo geral, o modelo numérico foi mais rígido que o modelo experimental. Entretanto, as deformações captadas nos nós próximos à base da conexão (ST-1, na posição 40) foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves.

A tabela 6.5 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.7 mostra os perfis d=entre os resultados para comparação.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-SEC)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
370	0,000009	0,000026	0,000065	0,000002	0,000012	0,000021
280	0,000002	0,000018	0,000035	0,000004	0,000020	0,000036
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000003	0,000017	0,000030
120	0,000005	0,000023	0,000041	0,000003	0,000014	0,000025
40	0,000005	0,000017	0,000025	0,000003	0,000013	0,000023

Tabela 6.5 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-SEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

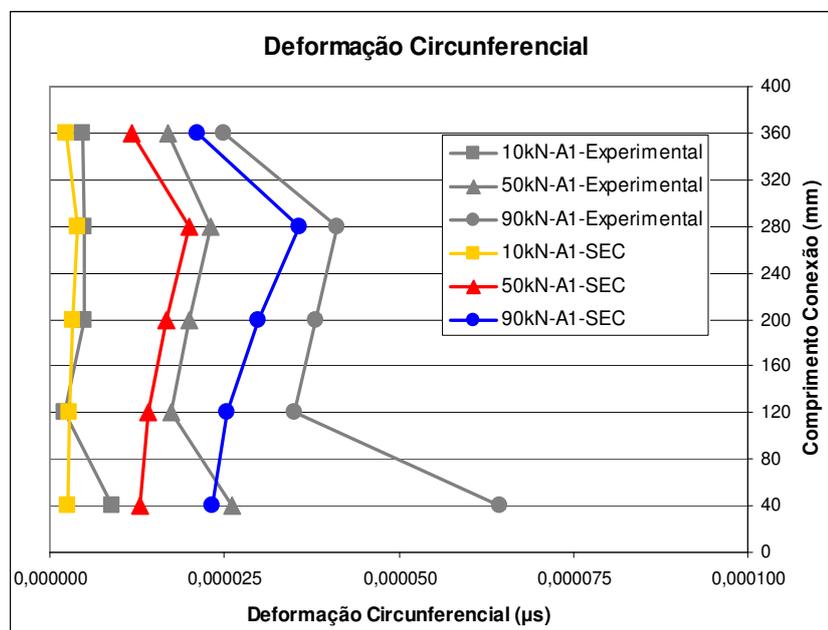


Figura 6.7 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-SEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

A diferença de deformação entre o modelo numérico, onde foi simulada a aderência perfeita, e a deformação registrada no modelo experimental pode ter ocorrido devido a problemas na instrumentação (strain gauge) do modelo experimental, ou um comportamento anômalo que o modelo numérico não pode simular como inclinações ou expansão circunferencial localizada na base da conexão, dados que poderiam ter sido registrados se houvesse um número maior de sensores distribuídos simetricamente pela conexão do modelo experimental.

6.2.3 Análise de Tensões do Modelo Numérico

a. Diagrama de Tensões Cisalhantes

Os esforços resultantes da aplicação da carga no topo da conexão e da reação na base da mesma conexão mantiveram o sistema em equilíbrio. Foram gerados perfis de tensões normais (σ_y) e cisalhantes (σ_{xy}) na interface tubo/mistura (medidos no tubo), mistura/luva (medidos na luva) e no centro da mistura, conforme indicado na figura 6.8.

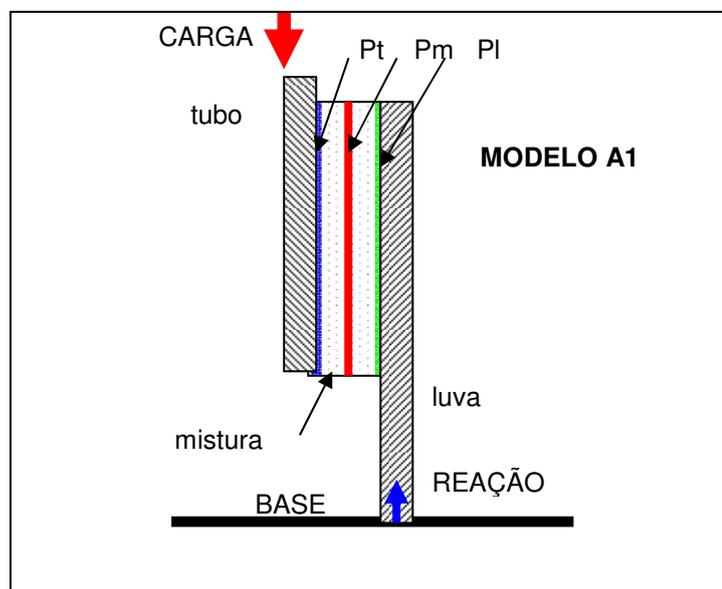


Figura 6.8 – Localização dos perfis de cisalhamento (azul) interface tubo/mistura, (verde) interface mistura/luva e (vermelho) no centro da mistura.

A figura 6.9 mostra a coincidência dos perfis de cisalhamento no tubo e na luva (Pt e PL) e que o perfil da mistura é aproximado dos demais ($Pt \simeq PM$), quando é aplicada a carga de ruptura de 95 kN.

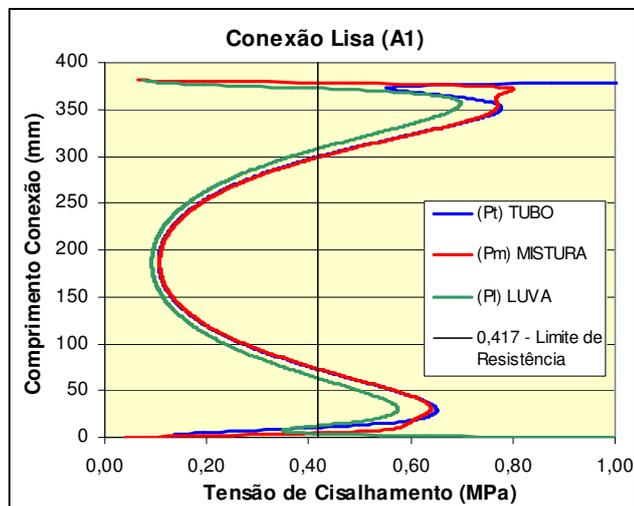


Figura 6.9 – Diagramas de tensões cisalhantes para os modelos A1-SEC para carga de 95 kN destacando a carga limite de resistência (0,417MPa).

Na figura 6.9 da conexão lisa (A1-SEC) é mostrado que existe uma coincidência entre as curvas de tensões cisalhantes dos perfis (Pt) do tubo e (Pl) da luva, entre o comprimento de 25 a 350 mm, da conexão e essa coincidência é decorrente da simulação de aderência perfeita entre os membros tubulares e das características mecânicas adotadas para o material do tubo e da luva. A mistura foi capaz de transmitir a carga aplicada no tubo para a luva, se deformando e assim absorvendo parte das tensões cisalhantes como tensões de tração e compressão. As diferenças de cargas cisalhantes transmitidas através da mistura nas condições de contorno de aderência perfeita foram muito pequenas indicando que a maioria das tensões ocorridas na mistura foi de cisalhamento.

Pela fórmula 5.4, para a carga de ruptura da conexão (95 kN), foi encontrada a tensão limite de resistência da conexão ao cisalhamento na interface tubo/mistura (0,417MPa), que é a maior tensão uniforme equivalente entre os perfis gerados. Foi observado na figura 6.9 que a seção do centro da conexão possui tensões abaixo dessa tensão limite de resistência indicando que esse trecho ainda resiste ao cisalhamento. No diagrama de Conexão Lisa (A1) da figura 6.9 é mostrado que no topo da conexão a tensão cisalhante máxima na face do tubo é de 0,8122MPa e na base da conexão 0,6814MPa. Esses valores poderiam ser usados

como a tensão limite de resistência, contudo esses dados poderiam embutir nos resultados valores discrepantes não previstos pelo modelo analítico, tais como inclinações entre os membros tubulares da conexão.

b. Diagrama de Tensões Radiais

Outro diagrama gerado foi o de tensões radiais na mistura com o objetivo de levantar o comportamento da mesma quanto a esforços radiais e comparar os valores alcançados com o limite de resistência encontrado nos ensaios de laboratório descritos no Capítulo 3. O diagrama de tensões radiais mostra cinco perfis (M1 a M5) posicionados conforme o desenho esquemático abaixo.

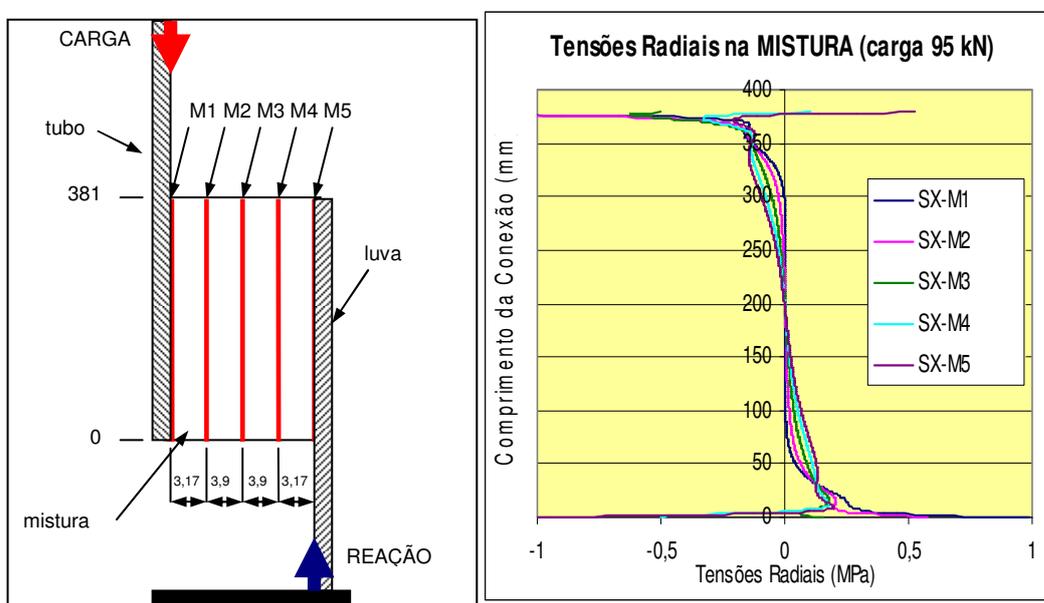


Figura 6.10 – Diagrama tensões radiais versus comprimento da conexão levantados em diversos perfis na mistura, aplicando-se a carga de 95 kN.

Foi observado pela figura 6.10 que as tensões radiais registradas foram de tração e decrescentes desde a base até o centro da conexão. Já no trecho do centro até o topo da conexão as tensões registradas foram de compressão e crescentes. O que se destaca é a ocorrência uma inversão das tensões, de tração para compressão, como um binário, já mencionado anteriormente no Capítulo 2. As tensões radiais máximas encontradas para a carga de 95 kN apresentaram valores de compressão máxima em torno de 4MPa e ficaram concentradas próximas ao topo da mistura no lado do tubo.

Outra característica mostrada é que o perfil junto ao tubo (M1) apresenta-se com menor variação de tensões que o perfil junto à luva (M5).

Pelos resultados das análises não houve indício de rompimento no centro da mistura para a carga de falha de 95 kN.

Comparando-se o limite de resistência levantado nos ensaios de compressão da mistura ($\sigma_y = 65,25$ MPa) com os valores máximos de tensões cisalhantes e radiais encontrados no modelo A1-SEC (4,0 Mpa) se conclui que o modelo trabalha dentro do regime linear elástico do material da mistura. Deve-se ressaltar que a mistura no modelo está confinada entre os tubulares.

A comparação acima não pode ser conclusiva devido a existência do binário discutido no Capítulo 2. Tanto a base do tubo quanto o topo da luva estão sujeitos à tração e não há levantamento da resistência da mistura à esse esforço.

Os resultados do modelo numérico com aderência perfeita (A1-SEC) gerado para as conexões lisa (A1), por serem lineares, não reproduziram os mesmos resultados do Programa Experimental de Alves, que exibiram comportamento não-linear e falha da conexão com a carga de 95 kN. A condição de aderência perfeita leva o modelo a não romper pois a mesma trabalha dentro do regime linear elástico do material mais frágil. Isso posto, foi iniciado o trabalho com elementos de contacto nas interfaces tubo/mistura e mistura/luva.

6.3. Conexão Com Elemento de Contacto (A1-CEC)

Os problemas que englobam contacto entre duas superfícies de contacto envolvem não-linearidade física e geométrica, apresentando, portanto, algumas dificuldades de solução. Dependendo das condições de contorno, determinadas regiões de um modelo podem entrar ou sair do contacto bruscamente quando submetidos aos esforços de cisalhamento. Nesse comportamento é pressuposto que a aderência entre os corpos já foi vencida e o que passa a atuar impedindo que os corpos deslizem um em relação ao outro é a força de atrito.

Entende-se por atrito a força que oferece resistência ao movimento relativo entre superfícies em contacto. O atrito de contacto entre duas superfícies depende da força normal e da união ou ligação entre os átomos de cada superfície (irregularidade das superfícies em contacto e a atração molecular). O atrito

estático atua entre superfícies em repouso relativo e seu valor varia de zero até a menor força necessária para se iniciar um movimento. A força de atrito estática é sempre maior que a força de atrito dinâmica.

O caso estudado nesse trabalho foi enquadrado no modelo básico de atrito de Coulomb, onde duas superfícies de contacto podem elevar as tensões de cisalhamento a certa magnitude através dessas interfaces antes delas iniciarem o deslizamento relativo, conforme mostrado na figura abaixo.

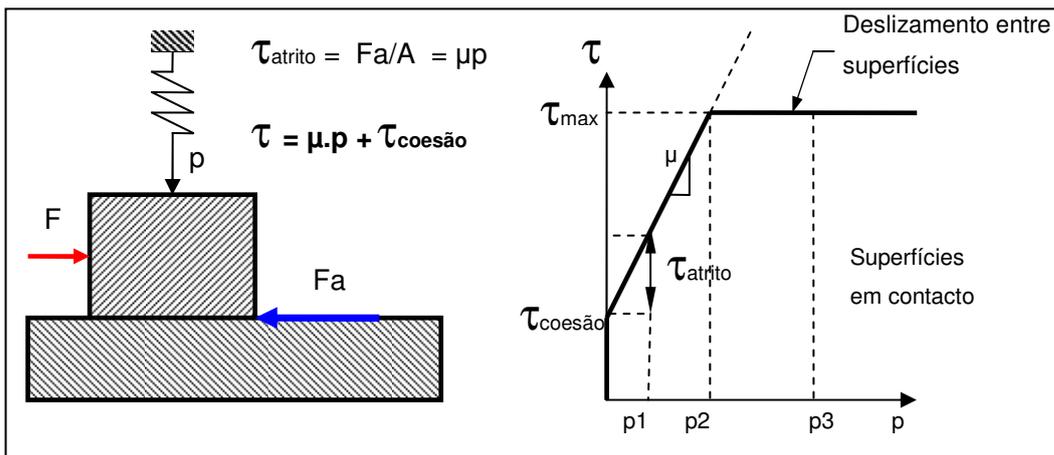


Figura 6.11 – Esquemático do modelo de atrito para o contacto superfície-superfície (modelo básico de atrito de Coulomb).

O modelo de atrito de Coulomb define uma tensão de cisalhamento equivalente (τ), na qual o deslizamento sobre uma superfície depende da pressão de contacto

p , ou seja,

$$\tau = \mu \cdot p + \tau_{\text{coesão}} \quad (6.1)$$

onde μ é o coeficiente de atrito entre as superfícies e $\tau_{\text{coesão}}$ é a coesão resistente ao deslizamento.

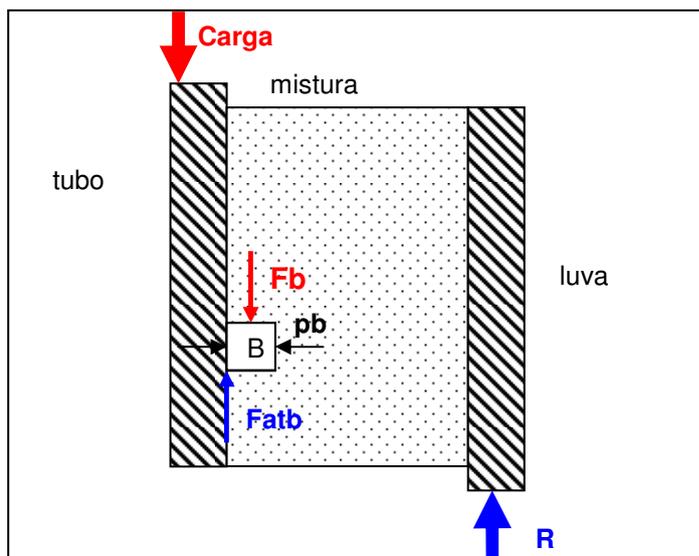


Figura 6.12 – Esquemático da análise dos corpos elementares na mistura.

Analisando o comportamento do elemento (B) da figura 6.12 e pelo gráfico da figura 6.11, se a força normal p for nula ($p=0$) e houver acréscimo de carregamento no tubo, a tensão cisalhante no elemento será resistente enquanto houver aderência entre as paredes do tubo e da mistura ($\tau_B < \tau_{coesão}$), e será máxima no momento em que essa aderência for perdida ($\tau_B = \tau_{coesão}$), onde τ_B é a tensão cisalhante resistente no elemento B. A $\tau_{coesão}$ é a tensão cisalhante para vencer o efeito de adesão provocado pelo uso de um adesivo.

Com a perda da aderência tem-se a ocorrência do deslizamento e somente a força normal p faz efeito até um determinado limite. No gráfico da figura 6.8, exemplificado pela força ($p_1 > 0$), temos $\tau_B = \tau_{coesão} + \tau_{atrito}$. A conexão agora perdeu a aderência mas não desliza devido à tensão cisalhante resistente ao atrito $\tau_{atrito} = \mu \cdot p$.

Analisando pelo mesmo gráfico 6.8 e continuando com o carregamento F sobre o tubo até alcançar a força p_2 normal à interface tubo/mistura, onde é atingido o atrito estático máximo (τ_{max}), tem-se como resultado tensões cisalhantes máximas a partir das quais qualquer incremento de carga sobre o tubo fará as superfícies deslizarem entre si, ou seja, a partir dessa carga aplicada sobre

o tubo ocorre o deslizamento relativo entre as superfícies ($\tau_B = \tau_{coesão} + \tau_{atrito} = \tau_{max}$).

Uma vez que a tensão ao cisalhamento máxima é excedida ($\tau_B > \tau_{coesão} + \tau_{atrito} = \tau_{max}$) as duas superfícies irão deslizar relativamente uma à outra independente se o carregamento sobre o tubo crie uma força normal p_3 (sendo $p_3 > p_2$). Esse estado é conhecido como DESLIZAMENTO.

Pelo gráfico 6.10, prosseguindo com o carregamento e após iniciado o deslizamento entre as superfícies, tem-se que a tensão cisalhante não encontra mais resistência e fica nula ($\tau = 0$). No momento que encontra uma nova resistência que pode ser provocada por um efeito geométrico, por exemplo, a tensão resistente volta a subir até alcançar uma tensão cisalhante máxima (τ_{max1}) menor que a tensão cisalhante máxima inicial (τ_{max}) e equivalente à diferença entre a tensão cisalhante máxima e a tensão cisalhante devido à coesão ($\tau_{max1} = \tau_{max} - \tau_{coesão}$).

O critério de falha da conexão é estabelecido quando a conexão não suporta mais incremento de carga sobre o tubo.

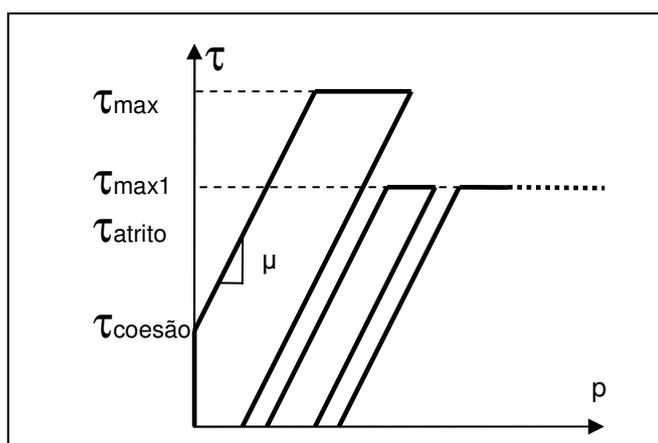


Figura 6.13 – Esquemático da análise dos corpos elementares na mistura.

6.3.1 Características da Modelagem

Na segunda simulação, feita inicialmente para a conexão lisa (A1-CEC), foi incluído o elemento de contacto nas interfaces tubo/mistura e mistura/luva e foram mantidas as mesmas condições de contorno e propriedades dos materiais dos modelos sem elemento de contacto. O intuito foi o levantamento do comportamento da conexão após a perda de aderência até o deslizamento entre duas superfícies de contacto.

Os novos modelos foram concebidos com as seguintes características, utilizando o mesmo programa Ansys 10.0:

a) Material	Aço (tubo e luva)	Mistura	Elemento de Contacto
Módulo de Elasticidade (E)	$2,065 \times 10^5$ MPa	4504MPa	-
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	0,25	-
Coefficiente de atrito (μ)	-	-	0,626

Tabela 6.6 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem com elemento de contacto

a. O modelo criado foi axissimétrico. Foi adotada a mesma discretização feita na modelagem numérica sem elemento de contacto. Buscou-se que a modelagem não interferisse na convergência e tivesse um custo computacional reduzido. As condições de contorno foram as mesmas utilizadas no modelo do programa experimental, da modelagem analítica e da modelagem numérica sem elemento de contacto;

b. Foi selecionado para a área de contacto das interfaces o elemento de contacto *CONTA171 (2D Surface-to-Surface Contact Element)* que é um tipo de elemento de contacto 2D com dois nós unindo superfície-a-superfície. É usado para representar o contacto e o deslizamento entre superfícies 2D e superfícies deformáveis, definidas por esses elementos. O elemento é aplicável para análise estrutural 2D e análises de campos acoplados. É usado para elementos sólidos sem pontos médios (como exemplo o *PLANE42*). Para a área de contacto do aço (Superfície Alvo) foi selecionado o elemento *TARGET169 (3D Target Segment)*;

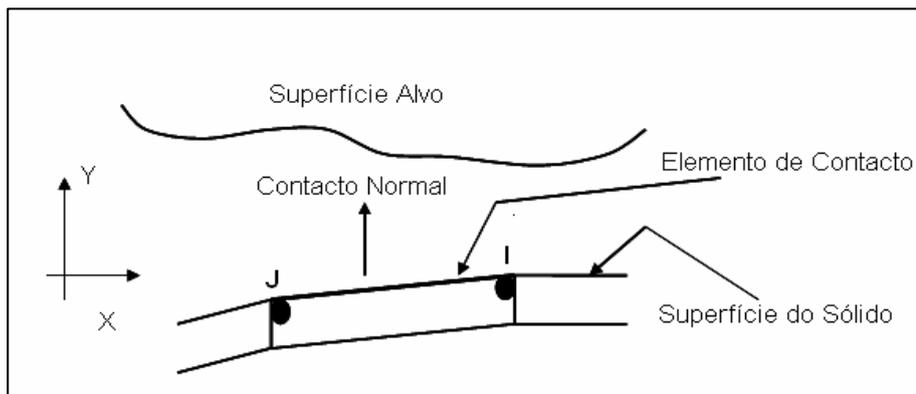


Figura 6.14 – Geometria do elemento CONTA171

- c. Os elementos de contacto superfície-superfície utilizados adotam o modelo de atrito de Coulomb, visualizado na figura 6.8, onde duas superfícies inicialmente em contacto irão deslizar uma em relação à outra a partir do momento em que certa tensão cisalhante for atingida.
- d. Foi selecionado para o aço (tubo e luva) e para a mistura o elemento *PLANE42 (2D Structural Solid)*;
- e. No modelo numérico da conexão lisa (A1) aplicou-se a força máxima experimental de 500 kN uniformemente distribuída no topo dos elementos do tubo em 20 incrementos de carregamento;
- f. Assumiu-se que a lei que rege o critério de falha da conexão é baseada na formulação da força de atrito de Coulomb e o elemento de contacto selecionado (*CONTA171*) admite tensões de atrito desse tipo.

O programa Ansys 10.0 é provido de uma extensão clássica do modelo de atrito de Coulomb.

$$\tau = C + \mu \cdot p \leq \text{TAUMAX} \quad (6.2)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento equivalente

C = tensão máxima de coesão

μ = coeficiente de atrito (adimensional)

p = pressão de contacto

TAUMAX = τ max = tensão de cisalhamento máxima

g. Para a variável de tensão de cisalhamento máxima **TAUMAX** foi adotado o valor calculado pela fórmula (5.4) de 0,417MPa que é muito próximo do valor de 0,411MPa registrado como a resistência de aderência para a conexão lisa (A1) extraído do relatório do Programa Experimental de Alves.

Testes com o modelo mostraram que o valor de TAUMAX poderia ser maior que o adotado o que aumentaria a rigidez desse modelo. Conforme visto nos resultados do item 6.2.2.c, o valor de TAUMAX também poderia ser adotado como um dos picos de tensão cisalhante próximos ao topo e a base da conexão do modelo que simula a perfeita aderência observando o diagrama da figura 6.5. Entretanto, para que pudesse ter parâmetros de comparação com o modelo analítico (0,417 MPa) e o valor relatado no Programa Experimental de Alves (0,411 MPa), esses valores não foram adotados.

h. Após a calibração do modelo de conexão lisa (A1) para que rompesse com carga igual a carga de ruptura da conexão (95 kN), registrada no programa experimental, foi encontrado o melhor valor para a tensão máxima de coesão (C) de 0,400MPa.

i. Utilizando os valores das variáveis acima na fórmula 6.1 encontrou-se um valor médio de tensão normal à superfície da interface tubo/mistura (p) de 0,027MPa, o que é esperado pela figura 6.10.

Em resumo, o novo modelo foi concebido com as seguintes características, utilizando o programa Ansys 10.0:

Material	tubo e luva (aço)	mistura (resina e cimento)	Elemento de Contacto
Módulo de Elasticidade (E)	2,065 x 10 ⁵ MPa	4504MPa	-
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	0,25	-
Coefficiente de atrito (μ)	-	-	0,626
Elemento de Contacto	<i>PLANE42</i>	<i>PLANE42</i>	<i>CONTA171</i>
Tipo de elemento	Axissimétrico		
Crítério de falha	Coulomb ($\tau = C + \mu \cdot p \leq TAUMAX$)		
TAUMAX	0,417 MPa ⁽¹⁾		
τ coesão (C)	0,400 MPa		
Fator de Rigidez Normal (FKN)	1,0		

(1) valor calculado pela fórmula 5.4

Tabela 6.7 – Parâmetros dos materiais utilizados na modelagem com elemento de contacto

6.3.2 Comparação dos Resultados Numéricos com os Experimentais

a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo

O modelo de conexão lisa (A1-CEC) que simulou a existência de um elemento de contacto nas interfaces tubo/mistura e mistura/luva foi menos rígido que o anterior. Foi gerado o diagrama de carga *versus* deslocamento relativo comparando os dados colhidos nesse novo modelo com os resultados obtidos no modelo analítico (Analítico E) e com o modelo do Programa Experimental de Alves, considerando a distância do ponto de referência na luva até o elemento no topo do tubo igual a 15 mm, conforme visto na figura 5.8. Os resultados estão exibidos na tabela 6.8 e na figura 6.15.

:Deslocamentos Relativos entre os Modelos Experimental, Analítico e Numérico com Elemento de Contacto da Conexão Lisa (A1)			
Carga (kN)	Conexão A1 (Lisa) Experimental	Modelo Analítico E	Modelo A1-CEC
5	0,00	0,005054	0,077867
10	0,03	0,010108	0,158048
20	0,06	0,020216	0,270296
30	0,07	0,030324	0,374769
40	0,09	0,040432	0,473619
50	0,10	0,050539	0,563037
60	0,10	0,060647	0,656305
70	0,11	0,070755	0,809890

Tabela 6.8 – Deslocamentos relativos do programa experimental, os resultados do modelo analítico calibrado (Analítico E) e os resultados do modelo numérico da conexão lisa com elemento de contacto.

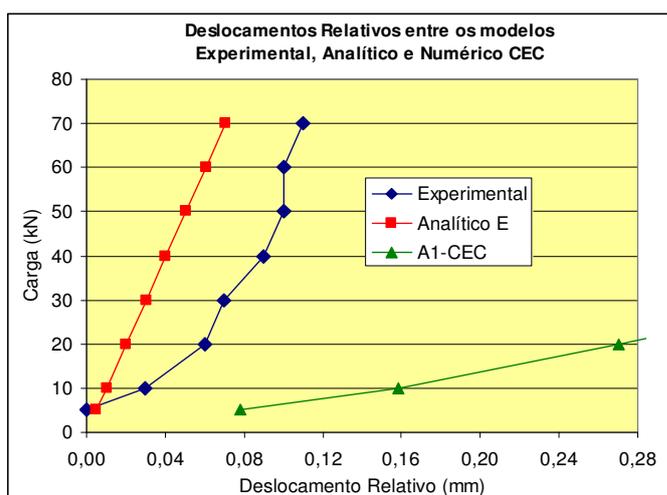


Figura 6.15 – Diagrama comparativo entre deslocamentos relativos

A flexibilidade da curva A1-CEC é devida a falta de ajuste no modelo para melhorar a situação de contato.

b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial

Quanto a rigidez axial, novamente foi usada a formula 5.16, e comparada com o resultado calculado para o modelo do Programa Experimental de Alves e para o modelo analítico. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 6.9.

Rigidezes Axiais Calculadas dos Modelos do Programa Experimentais, do Modelo Analítico e do Modelo Numérico com Elemento de Contato (A1-CEC)			
Variação da Carga (kN)	Conexão A1 (LISA) Experimental	Modelo Analítico E	Modelo A1-CEC
5	166,6667	989,3154	62,35891
10	333,3333	989,3154	89,08845
10	1000,0000	989,3154	95,71851
10	500,0000	989,3154	101,1634
10	1000,0000	989,4133	111,8343
10	0,0000	989,3154	107,2179
10	1000,0000	989,3154	65,11053
-70	636,3636	989,3294	86,43149

Tabela 6.9 – Rigidezes Axiais calculadas do modelo do Programa Experimental de Alves, do modelo analítico e modelo numérico com elemento de contacto (CEC).

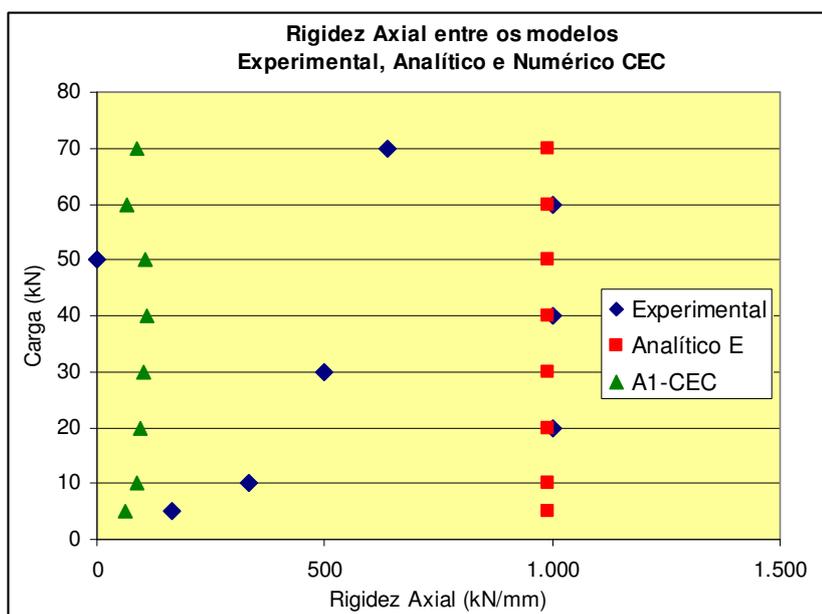


Figura 6.16 – Diagrama comparativo entre rigidezes axiais

Os diagramas de deslocamento relativo e de rigidez axial mostram que o modelo com elemento de contato (A1-CEC) é muito mais flexível que seus correspondentes modelos (experimental e analítico).

c. Diagrama Comprimento da Conexão *versus* Deformações

Novamente foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos de deformação Longitudinal e Circunferencial entre o modelo numérico com elemento de contato (A1-CEC) e os registros do Programa Experimental de Alves.

De posse dos resultados das leituras realizadas nos *strain gauges* do Programa Experimental de Alves foi feita uma comparação com os valores de deformação lidos nos nós do modelo estudado. Os nós foram selecionados buscando a proximidade da posição descrita no Programa Experimental. Para melhor visualização da comparação de resultados, os diagramas foram limitados a apenas três cargas (10, 50 e 90 kN), sendo que a carga de 90 kN foi a escolhida por ser mais próxima da carga de ruptura da conexão segundo o Programa Experimental de Alves.

Os resultados das análises mostram que as deformações geradas no modelo numérico com elemento de contato (A1-CEC) têm valores próximos dos resultados do modelo experimental, contudo esses resultados não podem ser abonados pois a rigidez do modelo numérico é muito menor que a do modelo do programa experimental.

As comparações estão exibidas nas tabelas 6.10 e 6.11 seguidas pelos diagramas correspondentes.

- Diagrama deformação longitudinal: Apesar da aproximação dos resultados do programa experimental, as deformações captadas nos nós próximos à posição do *strain gauge* do topo da conexão (ST-5, na posição 360) foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves,. Essa indicação pode ser decorrente de rigidez que a luva apresenta aos carregamentos cisalhantes longitudinais, há a tendência ao deslizamento entre a mistura e a parede interna da luva (falha na interface). O deslizamento não ocorre pois o modelo considera a aderência perfeita sem elemento de contato.

A tabela 6.10 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.17 mostra os perfis dentre os resultados para comparação.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC)		
	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
370	-0,000002	-0,000012	-0,000023	-0,000019	-0,000087	-0,000169
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000014	-0,000061	-0,000119
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000010	-0,000053	-0,000093
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000006	-0,000039	-0,000064
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000003	-0,000022	-0,000028

Tabela 6.10 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

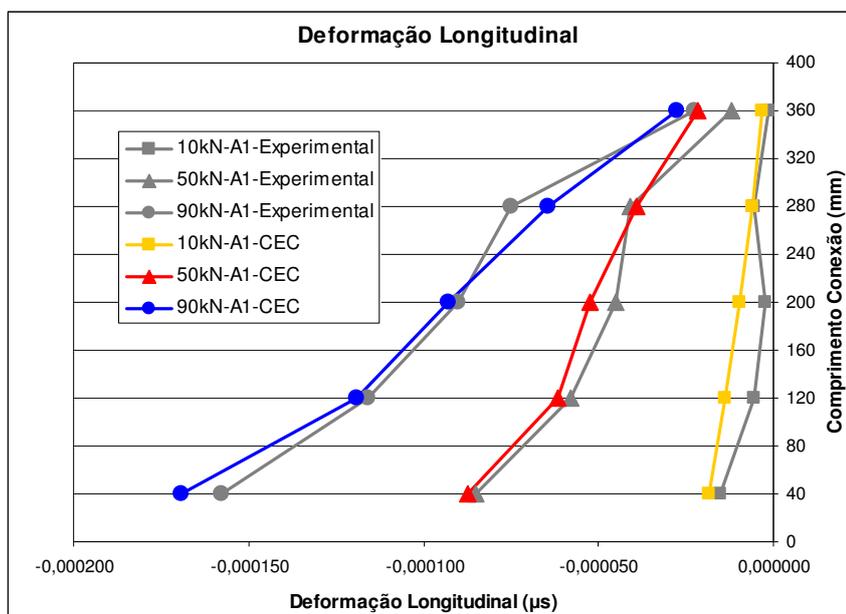


Figura 6.17 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-SEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

- Diagrama deformação circunferencial: O modelo numérico (A1-SEC) apresentou também uma aproximação dos resultados do programa experimental, mas de modo geral, o modelo numérico foi mais rígido que o modelo experimental. Entretanto, as deformações captadas nos nós próximos à base da conexão (ST-1, na posição 40) foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves.

A tabela 6.11 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.18 mostra os perfis d=entre os resultados para comparação.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC)		
	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
370	0,000009	0,000026	0,000065	0,000003	0,000013	0,000033
280	0,000002	0,000018	0,000035	0,000003	0,000017	0,000028
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000003	0,000016	0,000027
120	0,000005	0,000023	0,000041	0,000003	0,000017	0,000024
40	0,000005	0,000017	0,000025	0,000003	0,000016	0,000022

Tabela 6.11 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

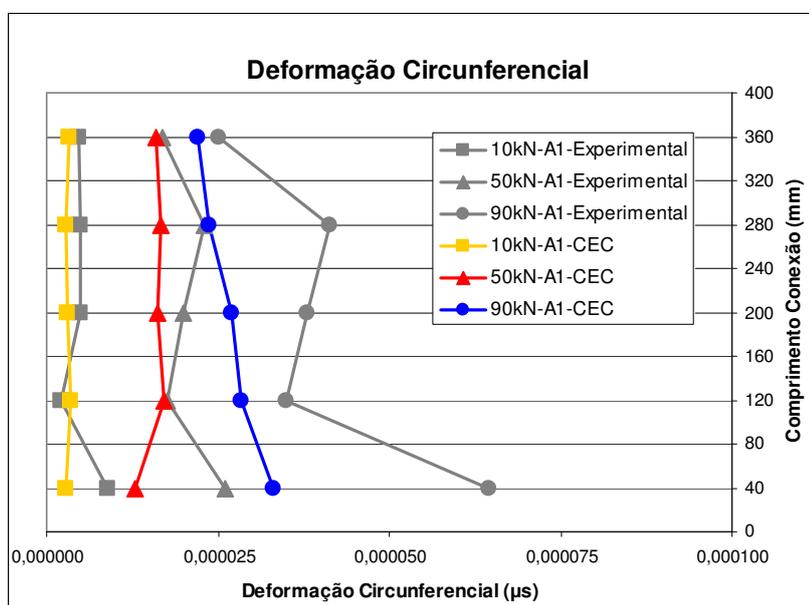


Figura 6.18 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN

6.3.3 Análise de Tensões do Modelo Numérico

a. Diagrama de Tensões Cisalhantes

Repetindo como anteriormente, foram aplicados esforços resultantes da aplicação da carga no topo da conexão e da reação dos apoios na base da mesma conexão que mantiveram o sistema em equilíbrio, com isso foram gerados perfis de tensões de cisalhantes (σ_{xy}) na interface tubo/mistura (Pt) (medido no tubo), mistura/luva (Pl) (medido na luva) e no centro da mistura (Pm), conforme a figura abaixo:

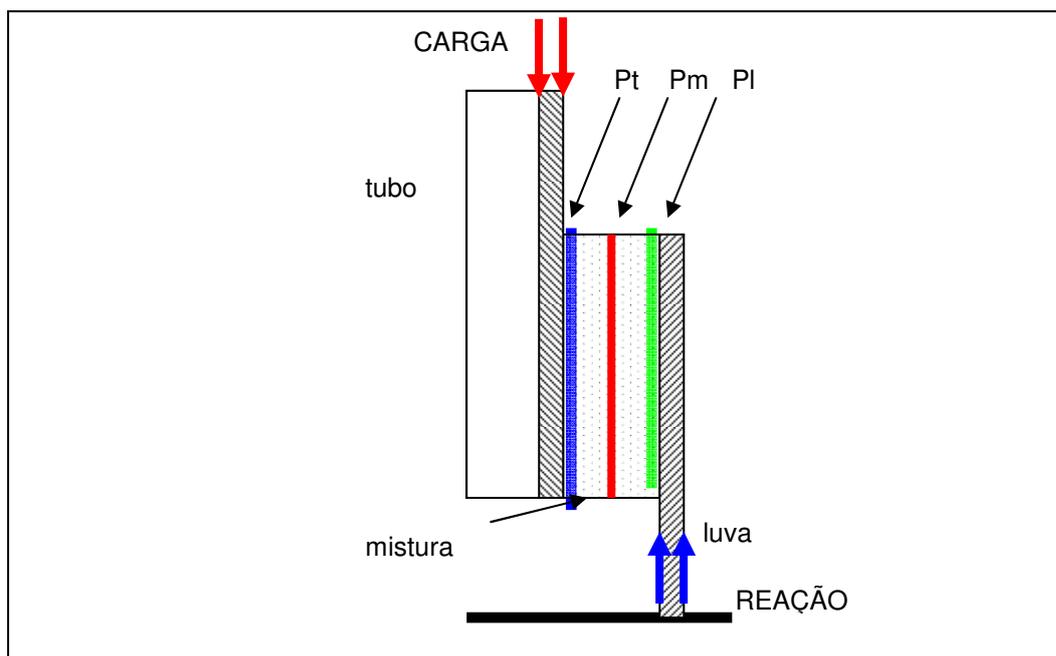


Figura 6.8 (reproduzido) – Localização dos perfis de cisalhamento (azul) interface tubo/mistura, (verde) interface mistura/luva e (vermelho) no centro da mistura

Com uma aplicação da carga de ruptura da conexão lisa (95kN) na fórmula 5.4, foi encontrada a tensão limite de resistência da conexão ao cisalhamento na interface tubo/mistura (0,417MPa), que é a maior tensão uniforme equivalente entre os perfis gerados, uma vez que possui a menor área radial. O mesmo foi feito para a interface mistura/luva onde foi obtido o valor de 0,355MPa.

Os diagramas a seguir exibem a evolução de tensão de cisalhamento nos perfis mostrados na figura acima. É notório que a baixa rigidez do modelo numérico mantém as tensões irregulares. As informações levantadas no programa experimental e as levantadas no laboratório durante esse trabalho não foram

suficientes para suprir a modelagem de dados que pudessem reproduzir a rigidez e os resultados do programa experimental.

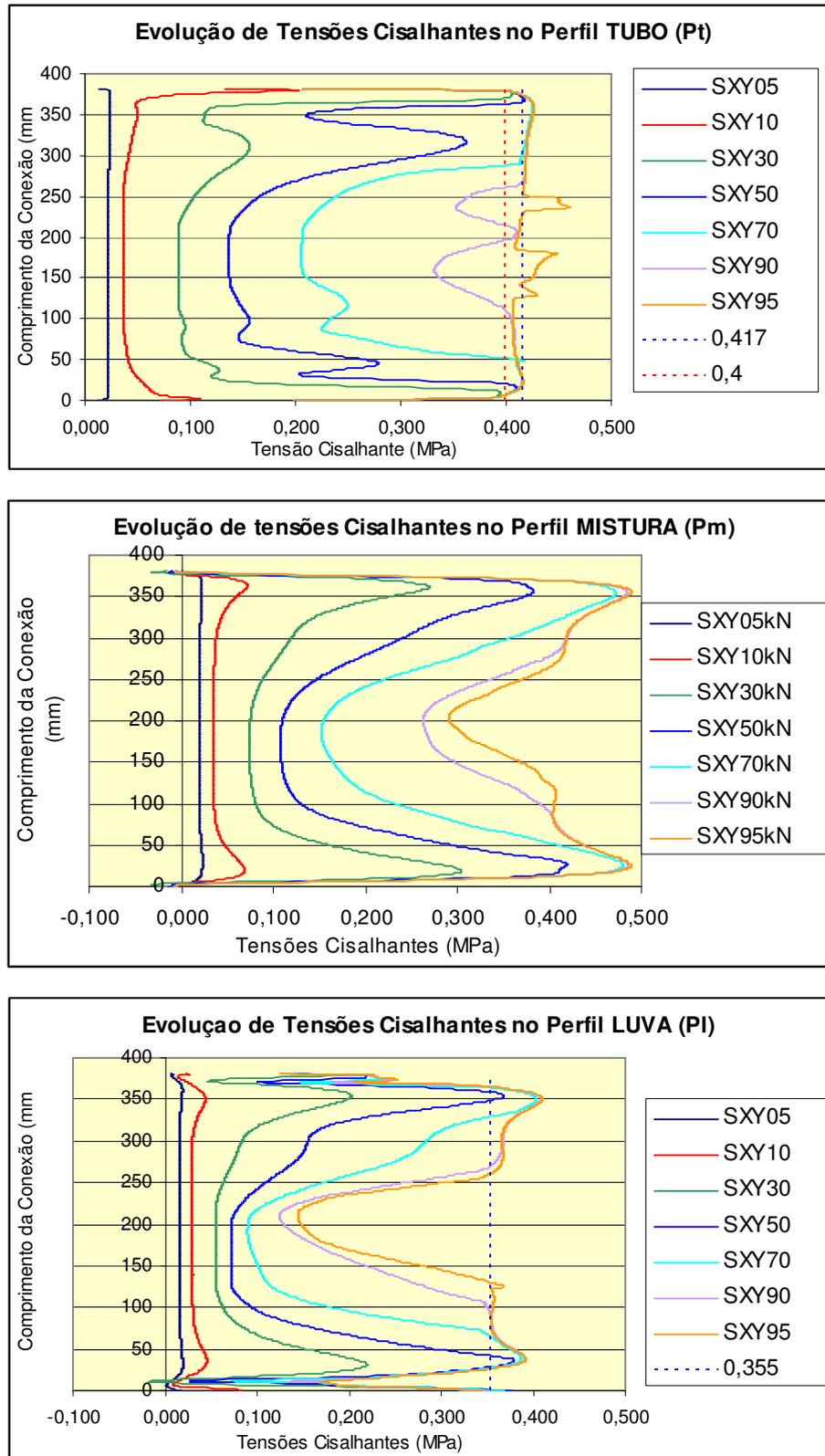


Figura 6.19 – Diagramas de evolução de perfis de cisalhamento nas interfaces tubo/mistura (Pt), mistura/luva (PI) e no centro da mistura (Pm), aplicando-se cargas de 5kN até 95kN.

Foi observado no diagrama do perfil tubo (Pt) que alguns trechos da conexão (entre 0 e 230 mm) possui tensões abaixo da tensão limite de resistência (0,417MPa) indicando que nesses trechos ainda existe resistência ao cisalhamento. Nos demais trechos, sem aderência, o deslizamento entre os membros tubulares é eminente.

b. Diagrama de Tensões Radiais

Novamente foi feito o estudo das tensões radiais, porém foram montados os diagramas M1, M3 e M5, conforme mostrado na figura 6.20, submetidos às cargas de 5, 10, 30, 50, 70, 90 e 95kN.

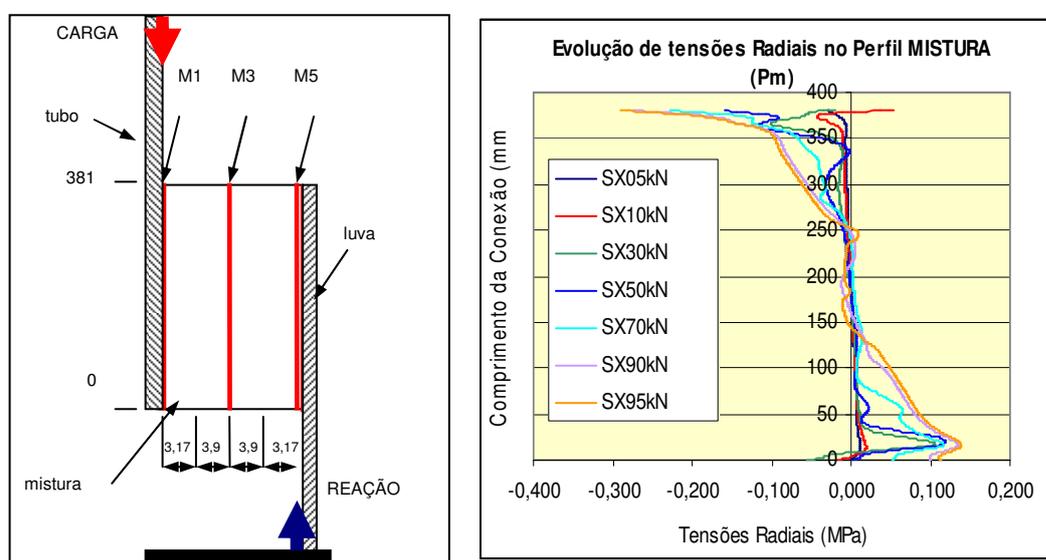


Figura 6.20 – Diagrama tensões radiais versus comprimento da conexão levantados em diversos perfis na mistura, aplicando-se a carga de 95 kN.

Foi observado pela figura 6.20 que as tensões radiais registradas foram novamente de tração e decrescentes desde a base até o centro da conexão. Já no trecho do centro até o topo da conexão as tensões registradas foram de compressão e crescentes. O que se destaca é a ocorrência da inversão das tensões, de tração para compressão, como um binário, já mencionado anteriormente no capítulo 2.

Foi verificado que nos perfis de tensão radial as curvas apresentam variações irregulares, provavelmente, devido a baixa rigidez do modelo.

As tensões radiais máximas encontradas nos perfis da mistura (perfil M3) para a carga de 95 kN apresentaram valores de compressão em torno de 0,3 MPa e

ficaram concentradas próximas ao topo da mistura no lado do tubo. O perfil junto ao tubo (M1) apresenta-se com menor variação de tensões que o perfil junto à luva (M5), conforme mostrado na figura 6.21, a seguir.

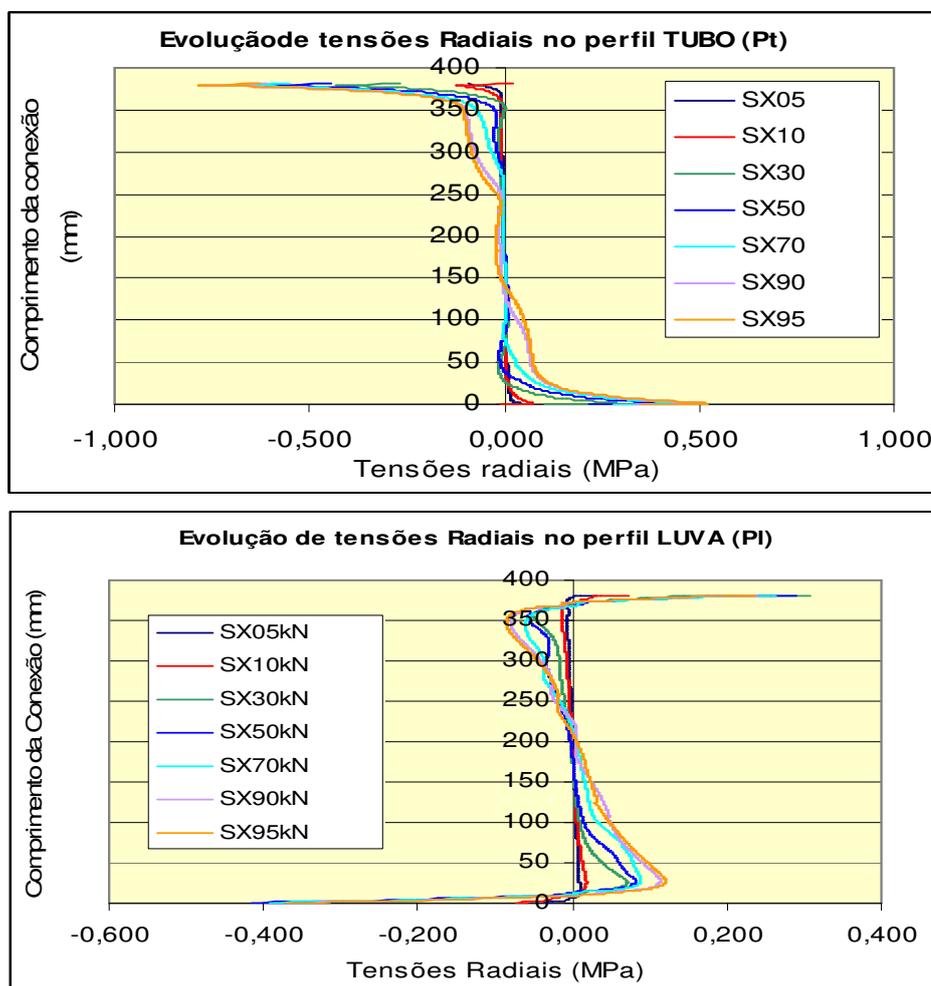


Figura 6.21 – Diagramas de evolução de perfis radiais nas interfaces tubo/mistura (Pt) e na interface mistura/luva (PI) do modelo numérico da conexão lisa com elemento de contato A1-CEC), aplicando-se cargas de 5kN até 95kN.

Comparando-se o limite de resistência levantado nos ensaios de compressão da mistura ($\sigma_y = 65,25$ MPa) com os valores máximos de tensões cisalhantes e radiais encontrados no modelo A1-CEC se conclui que o modelo trabalha dentro do regime linear elástico do material da mistura. Deve-se ressaltar que a mistura no modelo está confinada entre os tubulares e os elementos de contato com baixa rigidez permitem o escorregamento entre as superfícies.

Os resultados do modelo numérico com elemento de contato (A1-CEC) gerado para as conexões lisa (A1), por serem lineares, não reproduziram os mesmos resultados do Programa Experimental de Alves, que exibiram comportamento não-linear e falha da conexão com a carga de 95 kN. A

consideração do elemento de contato entre os tubulares levou a conexão a falhar não por deformação no material mais fraco, mas sim pela perda de aderência e pelo escorregamento entre as faces.

6.4. Ajuste do Modelo Numérico Com Elemento de Contato (A1-CEC-fkn56)

Nos diagramas anteriores foi notório que a baixa rigidez do modelo numérico manteve as tensões irregulares. Esses resultados não podem ser abonados pois não há informações que os respaldem e por essa razão houve a necessidade de executar melhorias no modelo numérico procurando ajustá-lo aos resultados do Programa Experimental de Alves. A melhoria pretendida não foi de se aumentar os esforços radiais na conexão, que poderia dissimular os resultados, mas sim melhorar a condição do contato fazendo com que os elementos resistissem melhor à perda de aderência nas mesmas cargas aplicadas.

6.4.1 Características da Modelagem

Aprofundando na análise do modelo e nos recursos da modelagem oferecidos pelo programa Ansys 10.0, foi feita uma melhoria na condição de contacto ajustando a constante real FKN definida como o fator de rigidez normal ao contacto. O fator limite usual é de 0,01 até 1,0, com o padrão 1,0 que é apropriado para grandes deformações. Após alguns testes comparativos com os resultados de deslocamento relativo e rigidez axial, foi verificado que o melhor fator para o modelo da conexão lisa foi 56.

As demais características da modelagem foram preservadas conforme a tabela 6.12, utilizando o programa Ansys 10.0:

Material	tubo e luva (aço)	mistura (resina e cimento)	Elemento de Contacto
Módulo de Elasticidade (E)	$2,065 \times 10^5$ MPa	4504MPa	-
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	0,25	-
Coefficiente de atrito (μ)	-	-	0,626
Elemento de Contacto	<i>PLANE42</i>	<i>PLANE42</i>	<i>CONTA171</i>
Tipo de elemento	Axissimétrico		
Critério de falha	Coulomb ($\tau = C + \mu \cdot p \leq TAUMAX$)		
TAUMAX	0,417 MPa ⁽¹⁾		
τ coesão (C)	0,400 MPa		
Fator de Rigidez Normal (FKN)	56		

(1) valor calculado pela fórmula 5.4

Tabela 6.12 – Características utilizadas na modelagem com elemento de contacto com ajuste

6.4.2 Comparação dos Resultados Numéricos com os Experimentais

a. Diagrama Carga *versus* Deslocamento Relativo

Foi gerado o diagrama de carga *versus* deslocamento relativo comparando os dados colhidos nesse novo modelo com os resultados obtidos no modelo do Programa Experimental de Alves, considerando a distância do ponto de referência na luva até o elemento no topo do tubo igual a 15 mm, conforme visto na figura 5.8.

O resultado para deslocamento relativo do modelo ajustado mostra que modelo da conexão (A1-CEC-fkn56) foi mais rígido que o anterior. O perfil gerado foi uma curva não-linear. Essa não-linearidade é devida a características próprias do elemento de contacto introduzidas no modelo. No diagrama da figura 6.22 são mostradas as divergência dos valores do modelo experimental, pois o modelo ajustado não foi capaz de reproduzir as não-linearidades registradas no

modelo experimental, causadas por razões até então desconhecidas. Na tabela 6.13 são mostrados os valores obtidos.

Deslocamentos Relativos dos Modelos Experimentais e do Modelo Analítico		
Carga(kN)	Conexão A1(Lisa) Experimental	Modelo A1-CEC-fkn56
5	0,00	0,004637
10	0,03	0,009809
20	0,06	0,020143
30	0,07	0,030453
40	0,09	0,040755
50	0,10	0,051096
60	0,10	0,061487
70	0,11	0,072124

Tabela 6.13 – Deslocamentos relativos dos programas experimentais e do modelo numérico com elemento de contacto com o ajuste do fator FKN (A1-CEC-fkn56).

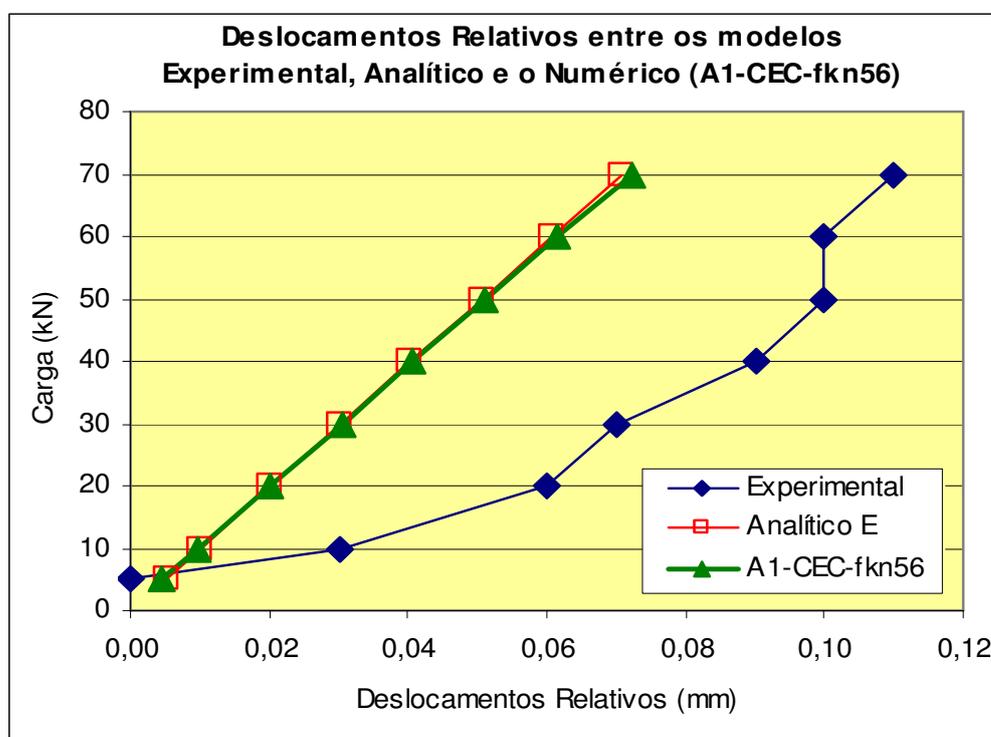


Figura 6.22 – Diagrama de deslocamentos relativos com os resultados do modelo experimental de Alves, Modelo Analítico e os modelos com elemento de contacto com ajuste (A1-CEC-fkn56).

b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial

Analisando os resultados da rigidez axial obtida também pela formula 5.16, e comparada com o resultado calculado para o modelo do Programa Experimental de Alves e para o modelo analítico. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 6.14.

Rigidezes Axiais Calculadas dos Modelos do Programa Experimentais, do Modelo Analítico e do Modelo Numérico com Elemento de Contato (A1-CEC-fkn56)			
Carga (kN)	Conexão A1 (LISA) Experimental	Modelo Analítico E	Modelo A1-CEC-fkn56
5	166,6667	989,3154	966,6132
10	333,3333	989,3154	967,7076
20	1000,0000	989,3154	969,9321
30	500,0000	989,3154	970,6853
40	1000,0000	989,4133	967,0245
50	0,0000	989,3154	962,3713
60	1000,0000	989,3154	940,1147
70	636,3636	989,3294	970,5507

Tabela 6.14 – Rigidezes Axiais calculadas do modelo do Programa Experimental de Alves, do modelo analítico e modelo numérico com elemento de contacto, sendo aplicada o ajuste (A1-CEC-fkn56).

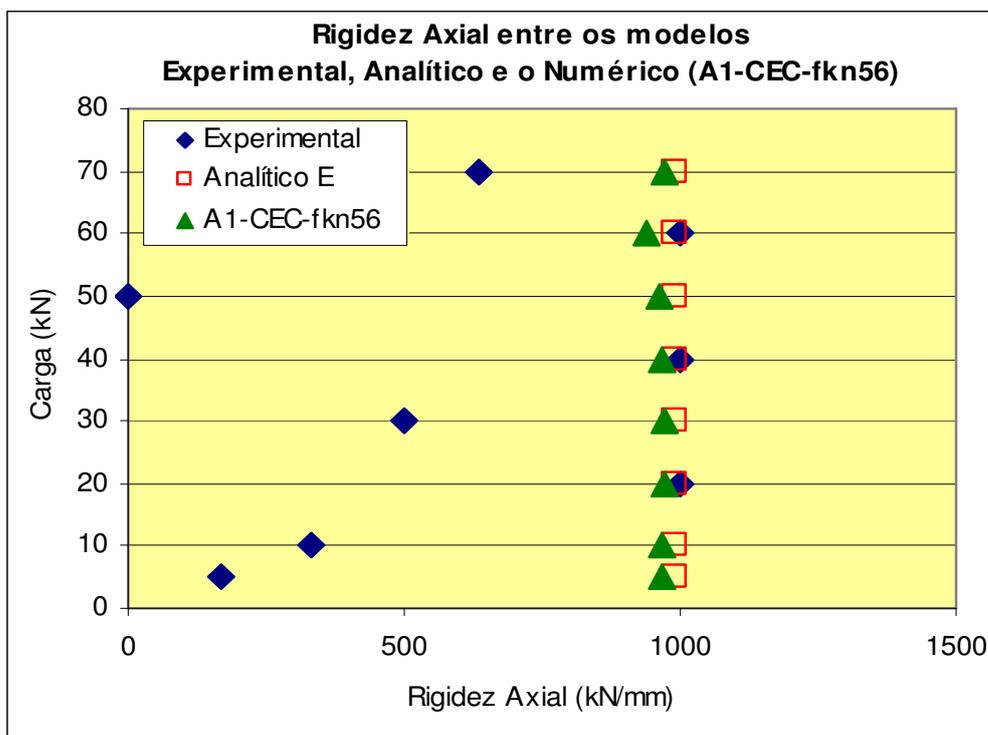


Figura 6.23 – Diagrama comparativo entre rigidezes axiais

Os diagramas de deslocamento relativo e de rigidez axial mostram que o modelo com elemento de contato (A1-CEC-fkn56) apresentou resultados próximos aos resultados do seu correspondente modelo analítico, esse último que é uma análise linear do comportamento da conexão. Entretanto, o modelo ajustado não conseguiu refletir as variações não-lineares do modelo experimental.

c. Diagrama Comprimento da Conexão *versus* Deformações

Na seqüência das comparações dos resultados para conexão lisa (A1), foi realizada a análise de deformação longitudinal e circunferencial. Novamente foram coletados os resultados do modelo numérico nos nós mais próximos das posições dos sensores (*strain gauges*) na face externa da luva, como mencionado no item 4.2.2, mostrada abaixo:

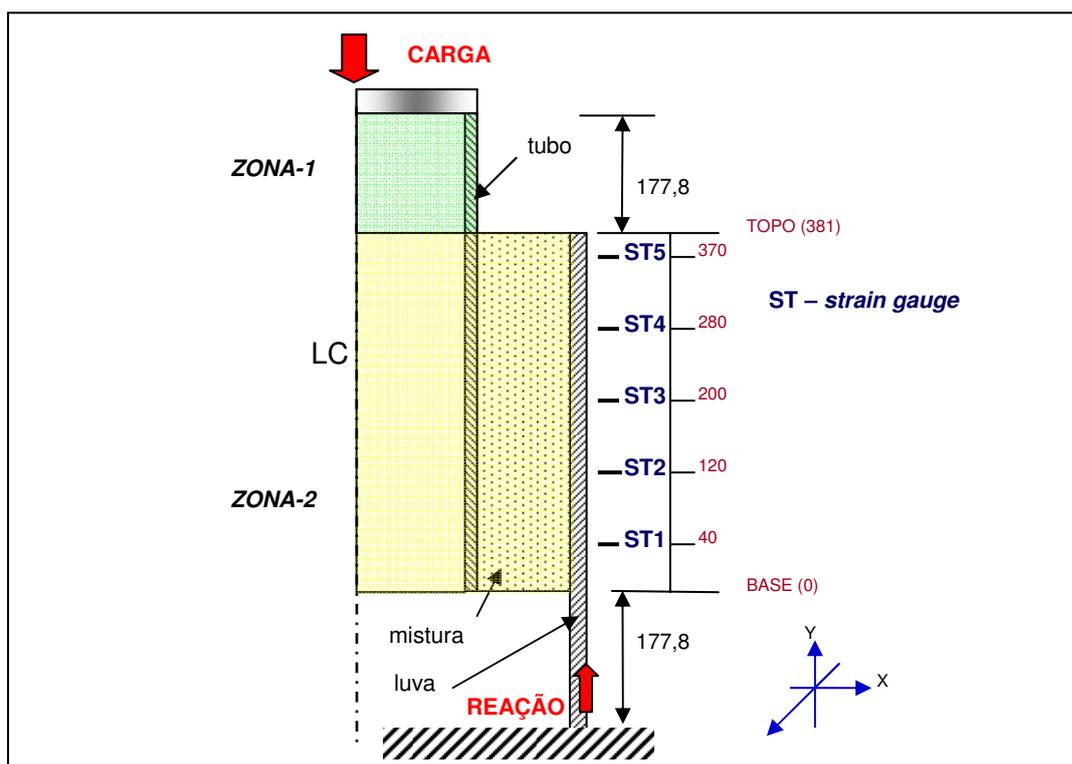


Figura 4.4 (Reproduzida) – Desenho esquemático do posicionamento dos *strain gauges* colados na superfície externa da luva.

De posse desses valores foram montados diagramas de deformação *versus* comprimento da conexão com o objetivo de comparação entre os resultados encontrados com os do modelo experimental.

A tabela 6.15 e o diagrama 6.24 exibem os valores encontrados para a deformação longitudinal e a tabela 6.16 e o diagrama 6.25 exibem para a deformação circunferencial.

- Diagrama deformação longitudinal: Apesar da aproximação dos resultados do Programa Experimental de Alves, as deformações captadas nos nós próximos à posição do *strain gauge* indicam que o modelo numérico ajustado é mais rígido que o modelo do programa experimental. Essa indicação de aumento de rigidez é decorrente da aplicação do fator de rigidez normal (FKN) que foi usada para melhoria da condição de contato. Contudo, modelo ajustado (A1-CEC-fkn56), por ser mais rígido, não permitiu uma melhor aproximação do modelo experimental como o modelo sem ajuste A1-CEC.

Os carregamentos cisalhantes longitudinais, levam a tendência de deslizamento entre as interfaces tubo/mistura e mistura/luva, porém o deslizamento continua a ocorrer após vencer as tensões de coesão e de atrito.

A tabela 6.15 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.24 mostra os perfis dentre os resultados para comparação.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
370	-0,000002	-0,000012	-0,000023	-0,000001	-0,000002	-0,000007
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000006	-0,000032	-0,000052
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000010	-0,000051	-0,000087
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000014	-0,000068	-0,000121
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000018	-0,000091	-0,000165

Tabela 6.15 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN

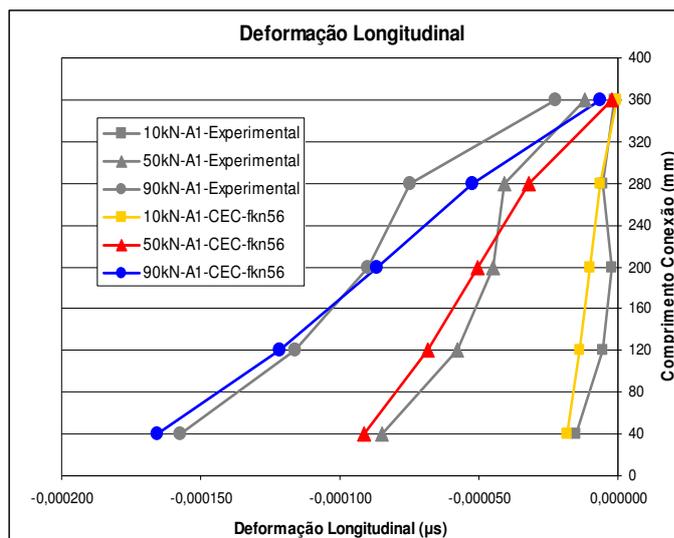


Figura 6.24 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN

- Diagrama deformação circunferencial: O modelo numérico (A1-CEC-fkn56) apresentou deformações menores que o programa experimental, e de modo geral, o modelo numérico foi mais rígido que o modelo experimental.

Permaneceu a diferença de deformação localizada na base da conexão do modelo numérico e no modelo experimental as razões podem ser decorrentes de problemas na instrumentação (*strain gauge*) do modelo experimental, ou um comportamento anômalo que o modelo numérico não pode simular, como inclinações ou expansão circunferencial. Esses dados que poderiam ter sido registrados se houvesse um número maior de sensores distribuídos simetricamente pela conexão do modelo experimental.

A tabela 6.16 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 6.25 mostra os perfis d=entre os resultados para comparação.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	0,000005	0,000017	0,000025	0,000003	0,000013	0,000023
280	0,000005	0,000023	0,000041	0,000003	0,000017	0,000028
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000003	0,000016	0,000029
120	0,000002	0,000018	0,000035	0,000003	0,000016	0,000029
40	0,000009	0,000026	0,000065	0,000003	0,000014	0,000026

Tabela 6.16 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN

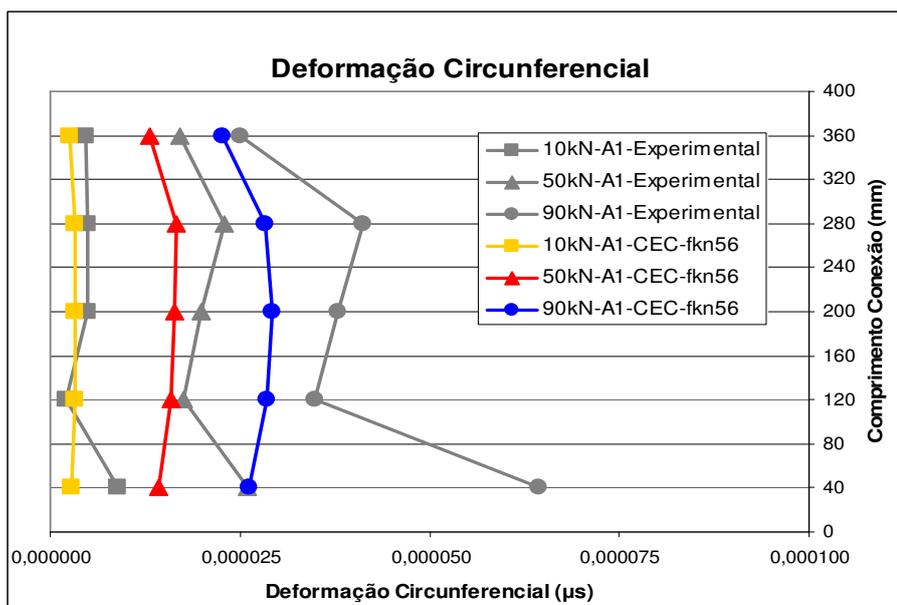


Figura 6.25 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN

Através do programa Ansys 10.0 foi realizada uma análise da situação do contacto no modelo numérico. A análise foi localizada na base da conexão do modelo numérico ajustado, sujeito ao carregamento de 90 kN.

A figura 6.26 exhibe em vermelho as regiões das interfaces sob o efeito da aderência (*sticking*) e em amarelo as regiões onde ocorre o deslizamento (*sliding*). A imagem obtida no programa Ansys 10.0 aparece distorcida para melhor visualização das deformações.

A imagem sinaliza que existiu uma perda de aderência nas interfaces tubo/mistura e mistura/luva localizadas próximas da base da conexão, porém, essa perda não reflete a deformação circunferencial na base da luva do modelo experimental.

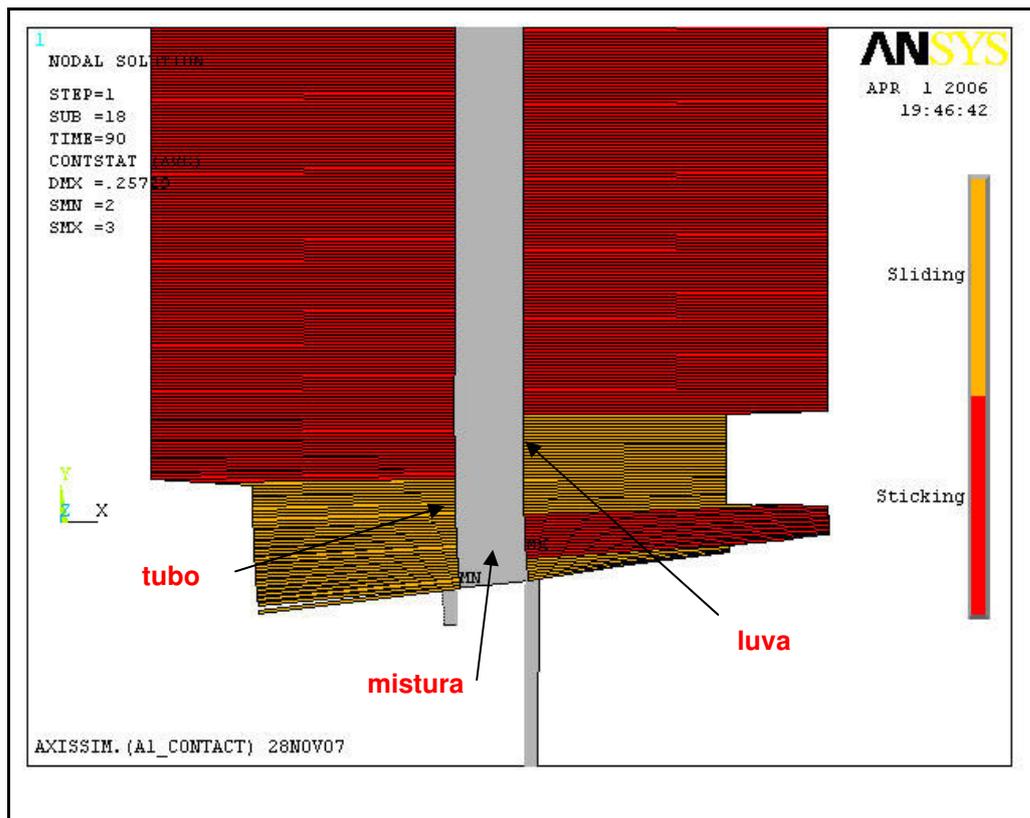


Figura 6.26 – Situação do contacto no modelo numérico ajustado da conexão lisa (A1-CEC-fkn56) para a carga de 90 kN mostrando a região que ainda possui aderência (*sticking*) e a região onde se perdeu a aderência e deslizou (*sliding*).

6.4.3 Análise de Tensões do Modelo Numérico

a. Diagrama de Tensões Cisalhantes

Os diagramas a seguir exibem a evolução de tensão de cisalhamento nos perfis mostrados na figura 6.8. O ajuste feito através do fator FKN aplicado no novo modelo numérico (A1-CEC-fkn56) tornou o comportamento dos perfis de tensões mais regular.

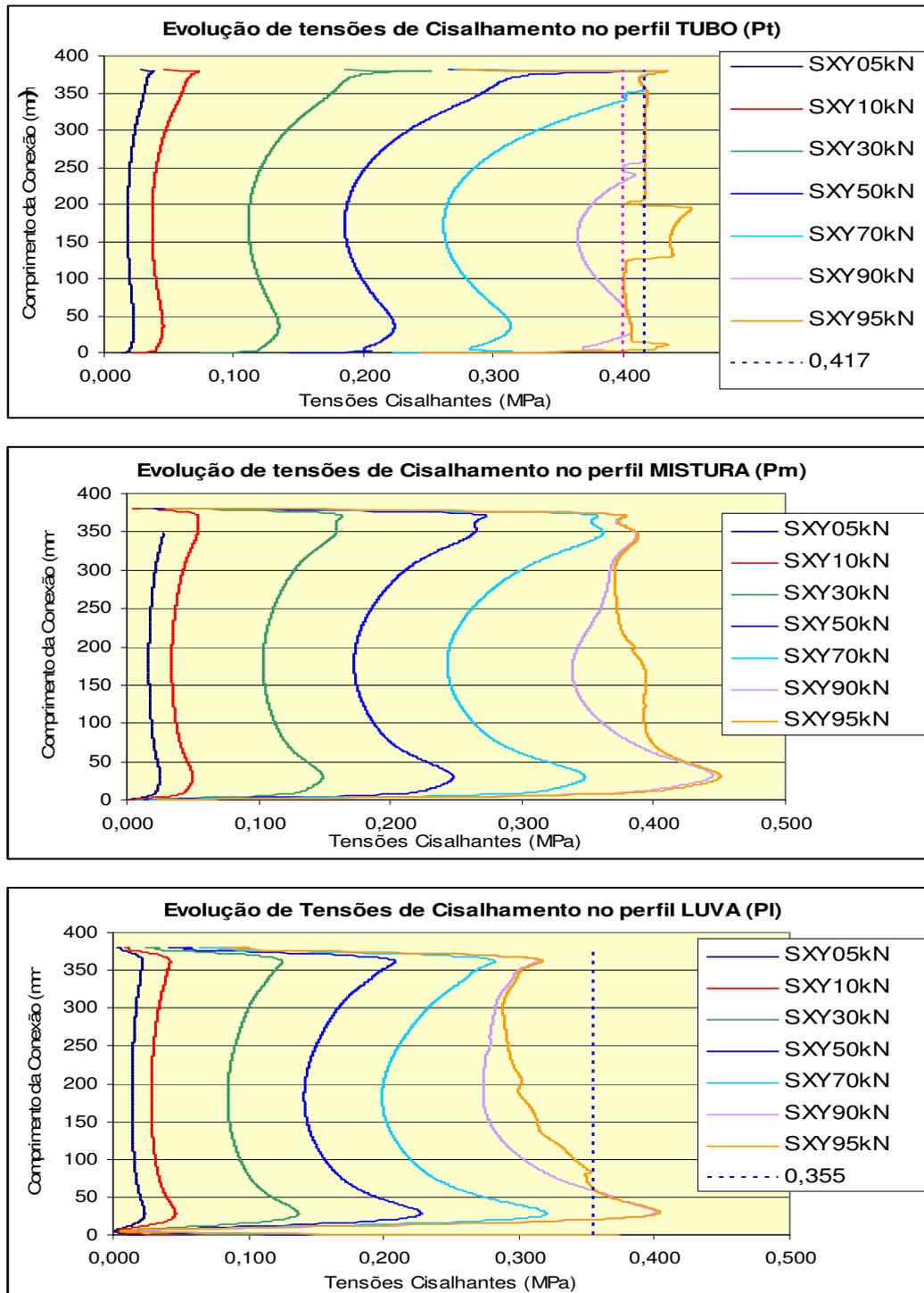


Figura 6.27 – Diagramas do modelo ajustado (A1-CEC-fkn56) onde é mostrada a evolução de perfis de cisalhamento nas interfaces tubo/mistura (Pt), mistura/luya (PI) e no centro da mistura (Pm), com os limites de resistência de aderência (0,417MPa) para o tubo e (0,355MPa) para a luya.

b. Diagrama de Tensões Radiais

Novamente foram montados os diagramas para o estudo das tensões radiais (M1, M3 e M5) conforme mostrado na figura 6.28, submetidos às cargas de 5, 10, 30, 50, 70, 90 e 95kN. Foi verificado que nos perfis as curvas apresentam variações mais regulares devido ao ajuste aplicado através do fator FKN.

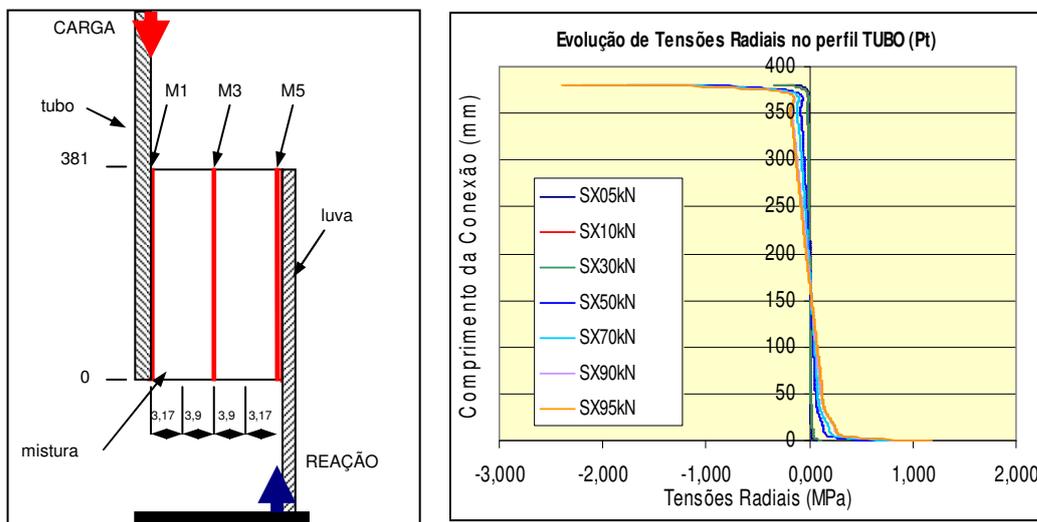


Figura 6.28 – Diagrama tensões radiais versus comprimento da conexão levantados em diversos perfis na mistura, aplicando-se a carga de 95 kN.

Foi observado pela figura 6.28 que as tensões radiais registradas foram novamente de tração e decrescentes desde a base até o centro da conexão. Já no trecho do centro até o topo da conexão as tensões registradas foram de compressão e crescentes. O que se destaca é a ocorrência da inversão das tensões, de tração para compressão, como um binário, já mencionado anteriormente no capítulo 2. O perfil junto ao tubo (M1) apresenta-se com menor variação de tensões que o perfil junto à luva (M5), conforme figura 6.17.

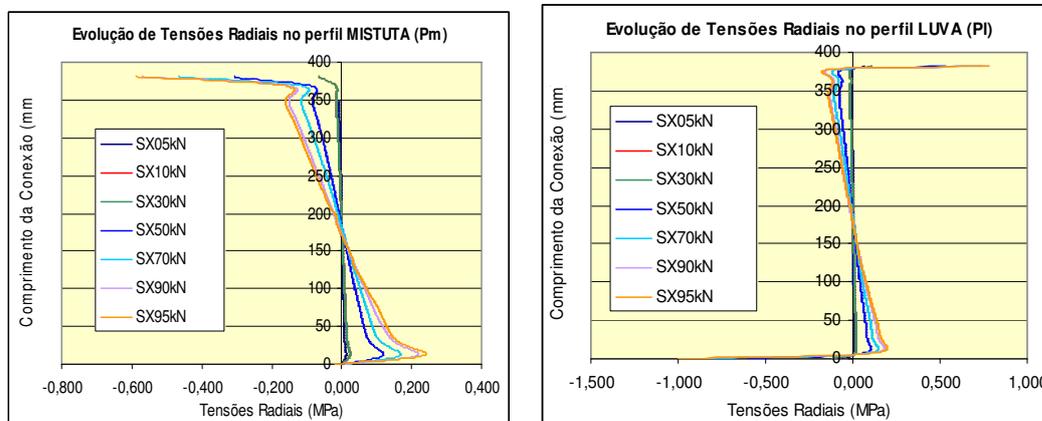


Figura 6.29 – Diagramas de evolução de perfis radiais nas interfaces mistura (Pm) e mistura/luva (Pl)

c. Comparação entre Tensões Cisalhantes dos Modelos Ajustados e Não-Ajustados

Realizando uma última comparação, temos os perfis de tensão de cisalhamento na interface tubo/mistura do modelo de conexão lisa sem ajuste (A1-CEC) e o ajustado (A1-CEC-fkn56). Conforme dispostos na figura 6.30, os diagramas de comparação entre perfis de cisalhamento para as interfaces tubo/mistura (Pt), mistura/luva (Pl) e no centro da mistura (Pm), dos modelos numéricos da conexão lisa com elemento de contacto, sendo (a) sem ajuste (A1-CEC) e (b) ajustado (A1-CEC-fkn56), foram decorrentes da aplicação da carga de 70kN. As marcações feitas nos diagramas referem-se ao Limite de resistência de aderência (0,4 MPa) e ao Limite de Resistência ao atrito (0,417MPa).

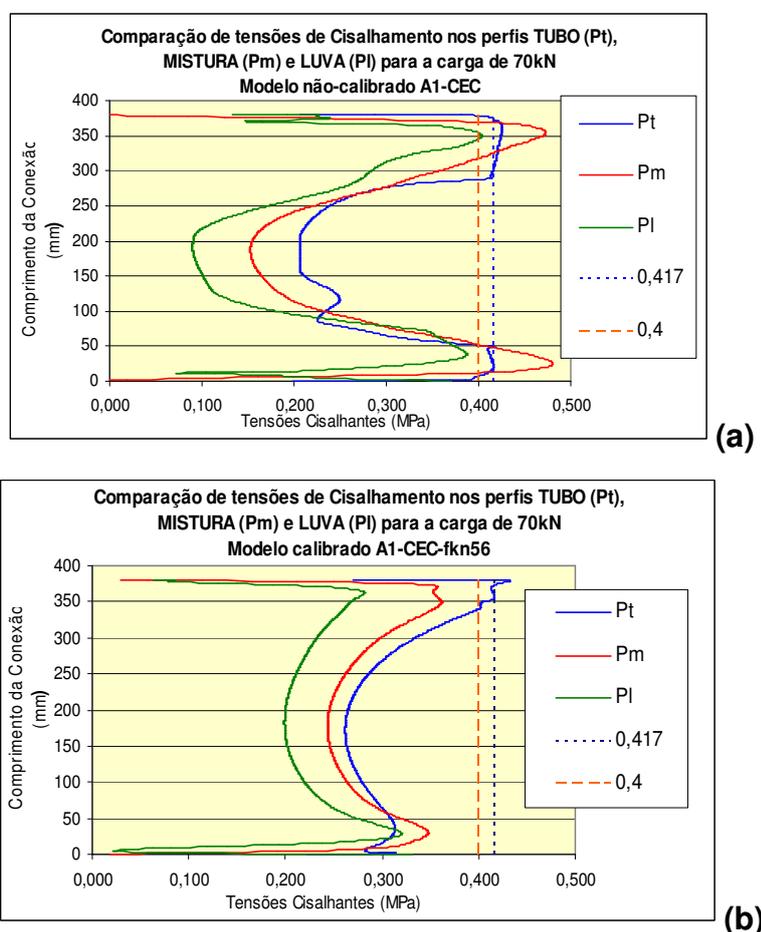


Figura 6.30 – Diagramas de comparação entre perfis de cisalhamento.

O fator fkn56 usado para ajustar o modelo numérico torna os perfis mais regulares. Essa regularidade pode ser respaldada pelas informações sobre os ensaios do programa experimental que descreve o comportamento regular da conexão.

6.5. Mecanismo de Redistribuição de Tensões

Objetivou-se conhecer o modo de redistribuição das tensões de cisalhamento, com a perda gradual de aderência nas interfaces e analisar a maneira como essa redistribuição de tensões pode influenciar na resistência de aderência da conexão.

Na busca do entendimento correto do mecanismo de redistribuição de tensões, foi realizada uma seqüência de testes **qualitativos** que simula a perda de aderência e o início do deslizamento passo-a-passo.

Foram conduzidos testes no modelo numérico sem calibração A1-CEC (axissimétrico) onde foram simulados comprimentos de regiões sem aderência na interface tubo/mistura (perfil A) e mistura/luva (perfil B).

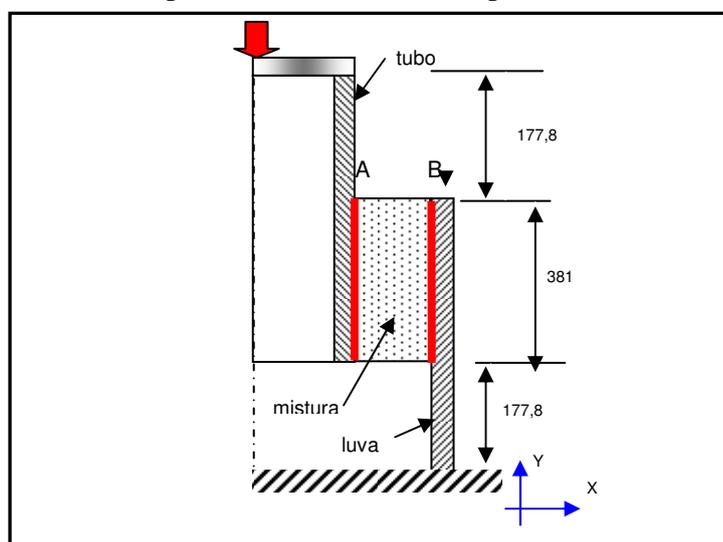


Figura 6.31 – Esquemático da localização dos perfis de cisalhamento A e B

Primeiramente foi simulada a perda de aderência e o início do atrito na interface tubo/mistura (perfil A), a partir do topo da conexão até o comprimento de 200 mm. A partir desse ponto foi iniciada a simulação da perda de aderência e atrito na interface mistura/luva. Conforme mostrado na tabela 6.17:

TESTE	Comprimento Aderido no TUBO (a partir da BASE, em mm)	Comprimento Aderido na LUVVA (a partir da BASE, em mm)
E1	381 (sem descolamento)	381 (sem descolamento)
E2	370	381 (sem descolamento)
E3	320	381 (sem descolamento)
E4	250	381 (sem descolamento)
E5	200	381 (sem descolamento)

Tabela 6.17 – Indicação da simulação dos comprimentos sem contacto nos perfis A e B

Em seguida foram gerados diagramas tensão de cisalhamento *versus* comprimento:

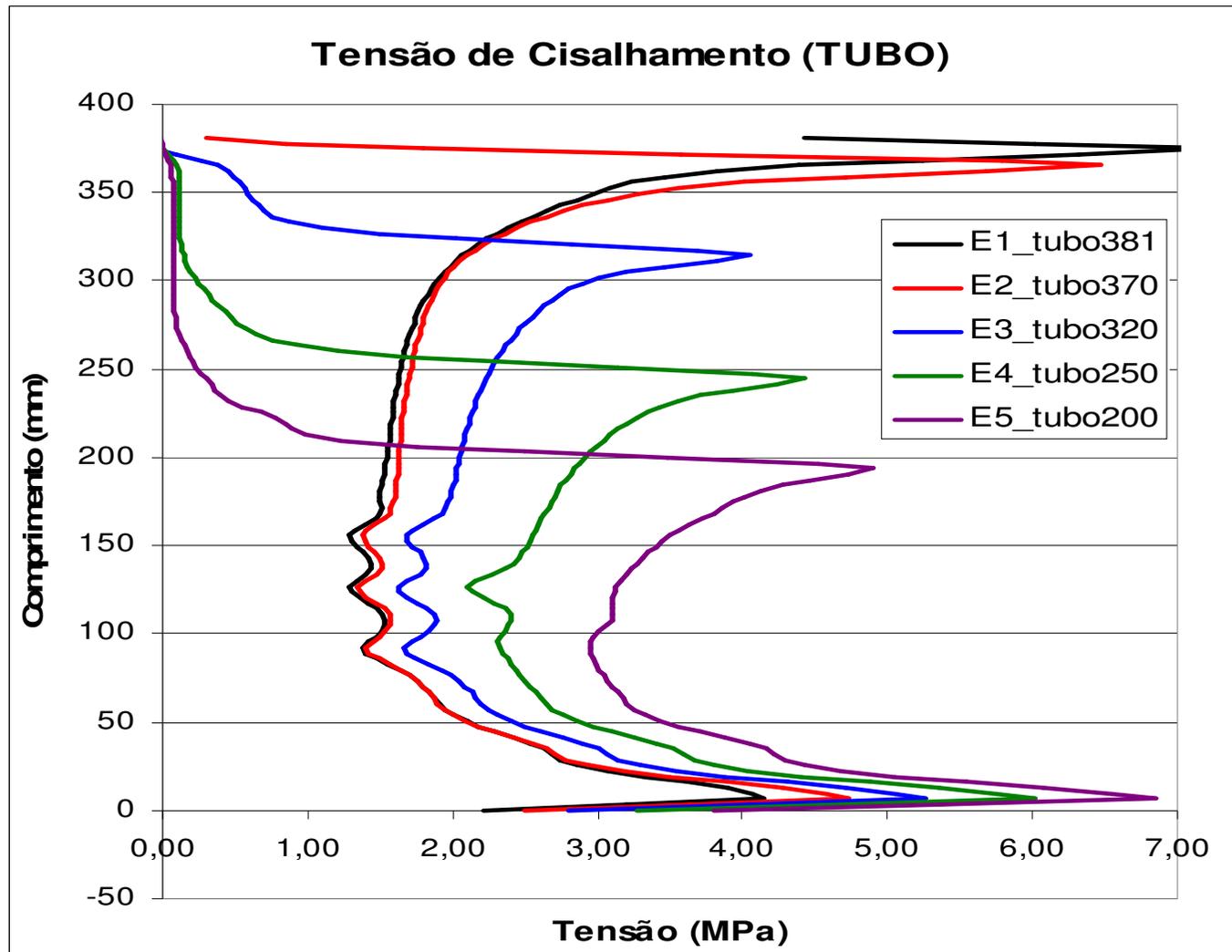


Figura 6.32 – Diagrama de tensão de cisalhamento versus comprimento da conexão no perfil A (TUBO).

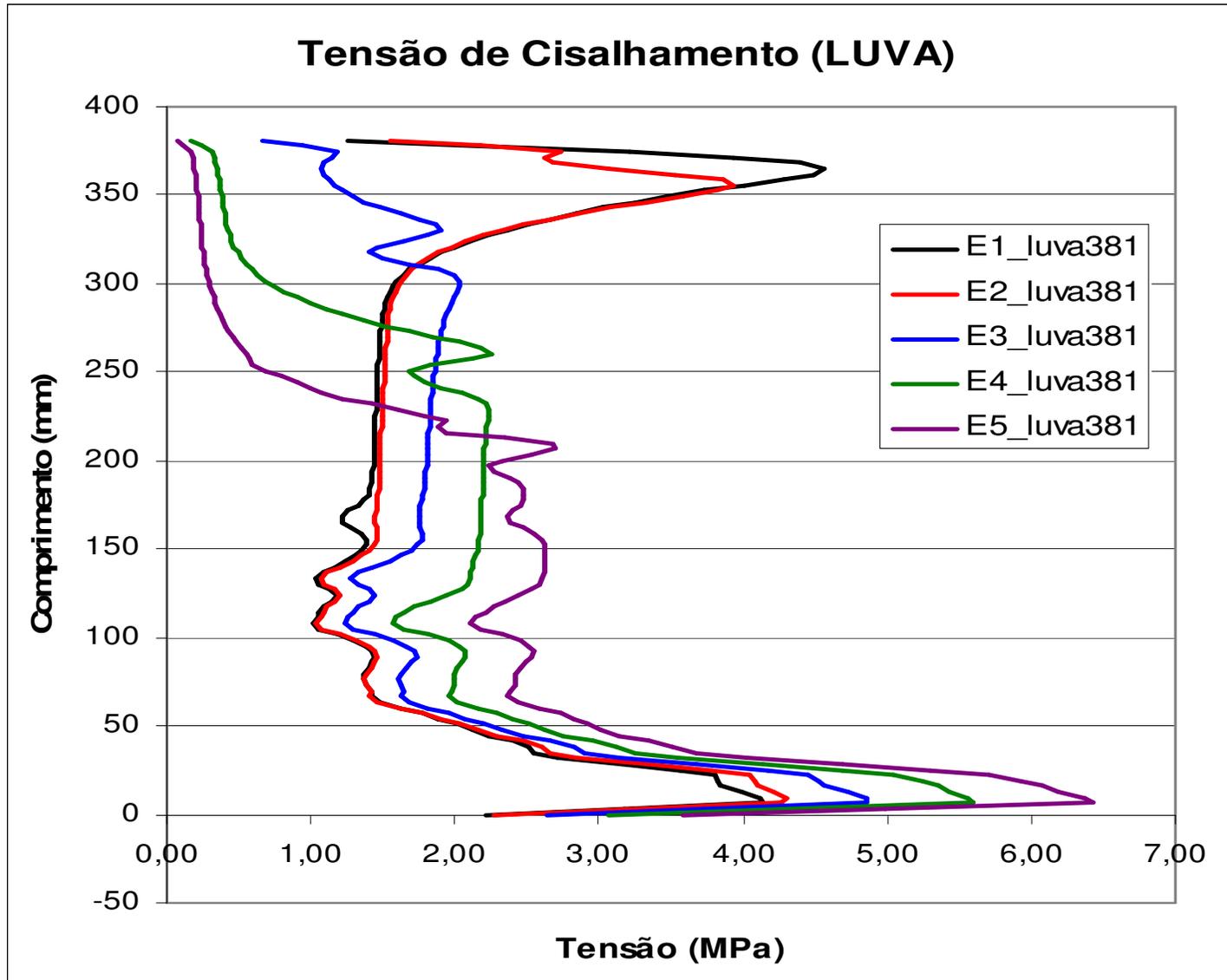


Figura 6.33 – Diagrama de tensão de cisalhamento versus comprimento da conexão no perfil B (LUVA)

Durante a análise de cada passo do processo se fez a avaliação dos perfis de tensão de cisalhamento e foi notado que nos perfis da interface tubo/mistura (perfil A) ocorre a redução dos picos de tensão máxima, tanto no topo quanto na base da conexão até o comprimento de 200 mm, ponto no qual se iniciaram as simulações na outra interface (perfil B). Com a simulação de perda de aderência e início do atrito na interface mistura/luva (perfil B), as tensões na interface tubo/mistura foram redistribuídas e voltaram a crescer.

Detalhando a análise do perfil A, mostrada nos gráficos 6.32, indica que com a aplicação do carregamento de 70 kN que conforme o tubo vai perdendo a aderência os picos de tensão vão caindo (E1 até E3), porém com uma maior perda de aderência os picos de tensão voltam a subir indicando que para continuar a perda de aderência é preciso uma carga maior do que a aplicada (E4 e E5). Foi observado que quando ocorre a perda de aderência esse processo também aumenta o pico de tensão na base do tubo.

Na análise do perfil B, mostrada nos gráficos 6.33, é observado também o aumento do pico de tensão na base da luva conforme vai ocorrendo a perda de aderência no tubo. Esse aumento de tensão é da mesma ordem de grandeza ocorrida na base do tubo.

Em seguida foram analisados dois casos de descolamento também na luva.

1) Na comparação dos casos E4 e E8, observa-se que a perda de aderência de 80 mm na base da luva da simulação E8 fez com que o pico de tensão na base do tubo fosse reduzido, porém a redistribuição de tensões fez com que o pico de tensões na extremidade ainda com aderência no caso E8 fosse maior que o pico de tensões na base da luva no caso E4.

2) Na comparação dos casos E3 e E9, observa-se que a perda de aderência de 80 mm na base da luva e de 10 mm no topo da luva, ambos da simulação E9, fez com que o pico de tensão na base do tubo fosse reduzido, porém a redistribuição de tensões gerou um comportamento contínuo de perda de aderência que deverá prosseguir até a finalização do carregamento. Essas análises mostram que a ruptura da luva é instável, ou seja, uma vez iniciada ela é contínua na mesma tensão até que o carregamento seja encerrado.

1) Análise dos casos E4 e E8, conforme tabela 6.18 abaixo:

TESTE	Comprimento Aderido no TUBO (a partir da BASE, em mm)	Comprimento Aderido na LUVA (a partir da BASE, em mm)
E4	250	381 (sem descolamento)
E8	250	301 (descolado 80 no topo)

Tabela 6.18 – Indicação da simulação dos comprimentos sem contacto nos perfis A e B

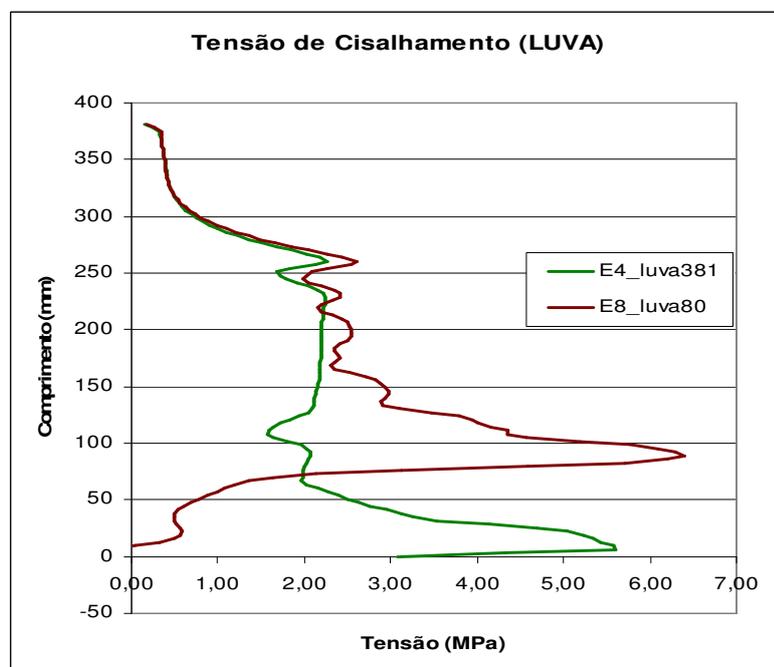
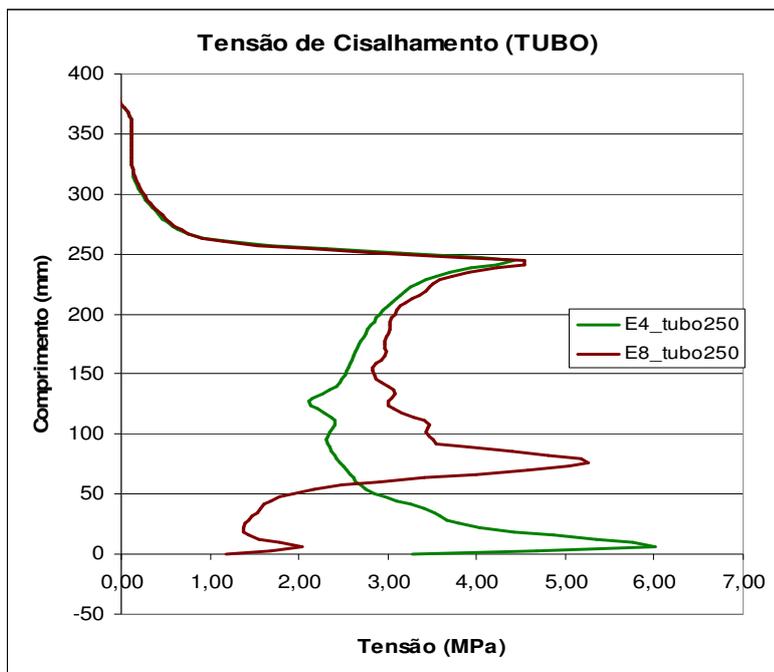


Figura 6.34 – Diagramas de tensão de cisalhamento versus comprimento da conexão nos perfis A (TUBO) e B (LUVA)

2) Análise dos casos E3 e E9, conforme tabela 6.19 abaixo:

TESTE	Comprimento Aderido no TUBO (a partir da BASE, em mm)	Comprimento Aderido na LUVA (a partir da BASE, em mm)
E3	320	381 (sem descolamento)
E9	320	90 (descolado 80 no topo e 10 na base)

Tabela 6.19 – Indicação da simulação dos comprimentos sem contacto nos perfis A e B

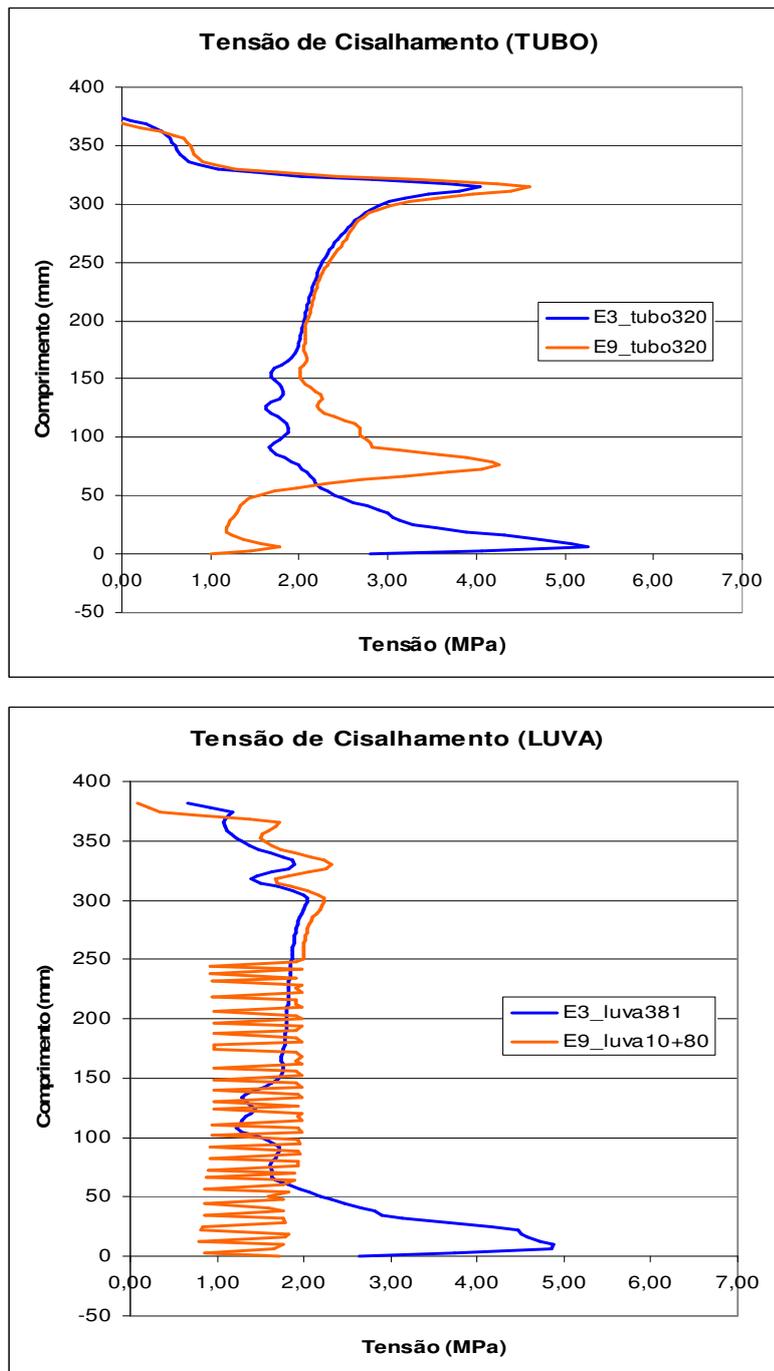


Figura 6.35 – Diagramas de tensão de cisalhamento versus comprimento da conexão nos perfis A (TUBO) e B (LUVA)

6.5.1 Comparação das deformações do modelo

Para complementação do estudo do processo de redistribuição de tensões foi montado um novo modelo numérico (A1-CEC-fkn56-SPA) a partir do modelo numérico da conexão lisa com aderência perfeita sem elemento de contato (A1-SEC), contudo no comprimento sem aderência foi colocado o elemento de contato com as mesmas características do modelo numérico calibrado (A1-CEC-fkn56). Os parâmetros para comparação escolhidos nessa simulação foram as deformações longitudinais e circunferenciais lidas no Programa Experimental de Alves. As simulações feitas foram:

a. Simulações de Perda de Aderência

Foram feitas 34 simulações de perda de aderência sendo que a melhor simulação foi colocada na tabela 6.20.

TESTE	Comprimento Aderido no TUBO (mm)	Comprimento Aderido na LUVA (mm)
Q34	321 (descolado 60 na base)	381 (sem descolamento)

Tabela 6.20 Indicação da simulação dos comprimentos sem contacto nos perfis A e B

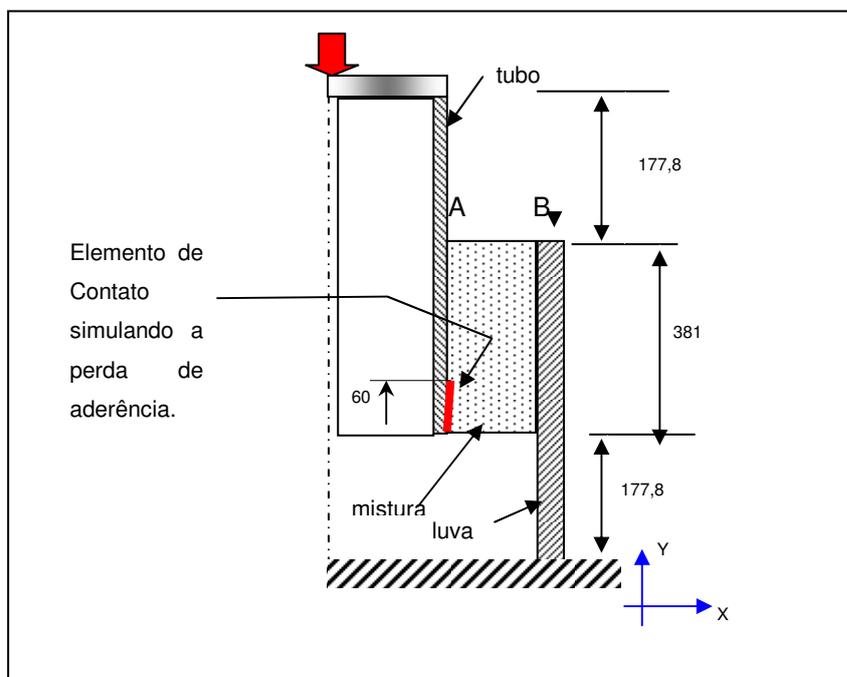


Figura 6.36 – Esquemático da localização do trecho sem aderência na simulação Q34

Os resultados de deformações longitudinais foram colocados na tabela 6.21 e figura 6.37.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-SPA)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	-0,000002	-0,000012	-0,000023	0,000000	-0,000001	-0,000003
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000009	-0,000046	-0,000083
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000011	-0,000056	-0,000100
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000013	-0,000065	-0,000118
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000018	-0,000091	-0,000163

Tabela 6.21 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SPA para as cargas de 10, 50 e 90 kN

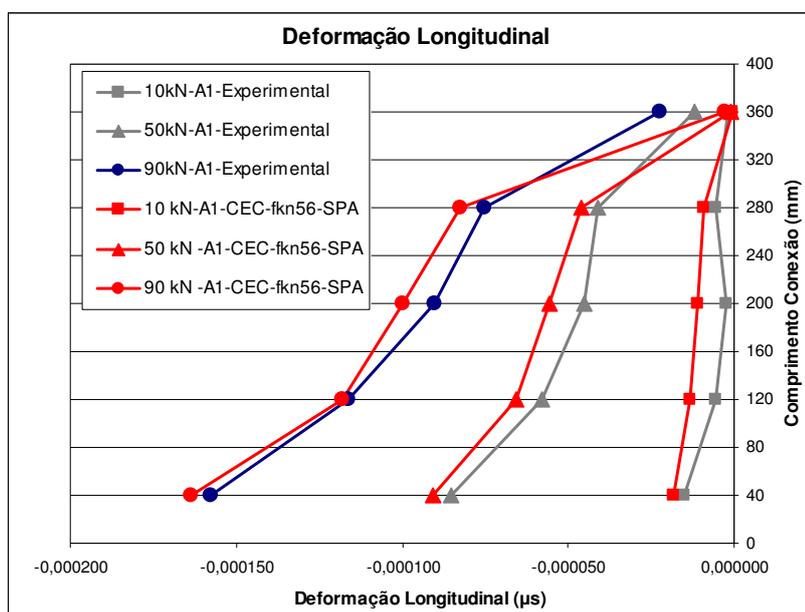


Figura 6.37 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SPA para as cargas de 10, 50 e 90 kN

A simulação de perda de aderência na base do tubo aproximou os perfis na base da conexão.

Os resultados de deformações circunferenciais foram colocados na tabela 6.22 e figura 6.38.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-SPA)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	0,000005	0,000017	0,000025	0,000002	0,000012	0,000021
280	0,000005	0,000023	0,000041	0,000004	0,000020	0,000036
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000003	0,000016	0,000029
120	0,000002	0,000018	0,000035	0,000003	0,000013	0,000024
40	0,000009	0,000026	0,000065	0,000004	0,000019	0,000035

Tabela 6.22 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SPA para as cargas de 10, 50 e 90 kN

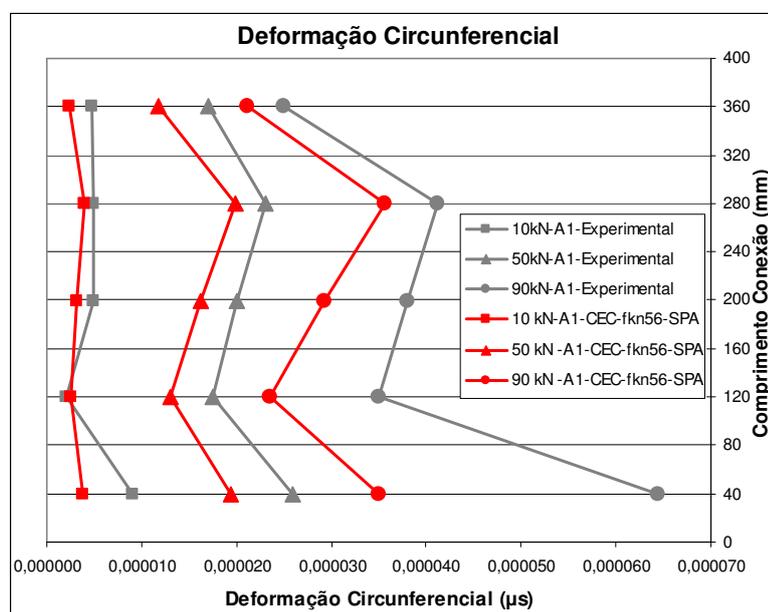


Figura 6.38 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SPA para as cargas de 10, 50 e 90 kN.

A simulação de perda de aderência permitiu uma aproximação dos perfis na base da conexão.

b. Simulações da Redução da Tensão de Ruptura da Mistura

O Programa Experimental de Alves forneceu o valor de 39,7 MPa como sendo a tensão de ruptura da mistura para corpos cúbicos. O ensaio de compressão executado durante esse trabalho foi levantado o valor de 65,25 MPa para corpos de provas cilíndricos, conforme a norma ABNT-5739 (ensaios de compressão para corpos cilíndricos). Foi feita uma simulação (A1-CEC-fkn56-STR), mantendo o mesmo trecho sem aderência da simulação Q34, reduzindo a metade os valores da curva de tensão versus deformação e os resultados de deformações longitudinais foram colocados na tabela 6.23 e figura 6.39.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-STR)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	-0,000002	-0,000012	-0,000023	0,000000	-0,000001	-0,000001
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000009	-0,000043	-0,000077
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000012	-0,000058	-0,000104
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000015	-0,000073	-0,000132
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000019	-0,000097	-0,000175

Tabela 6.23 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-STR para as cargas de 10, 50 e 90 kN

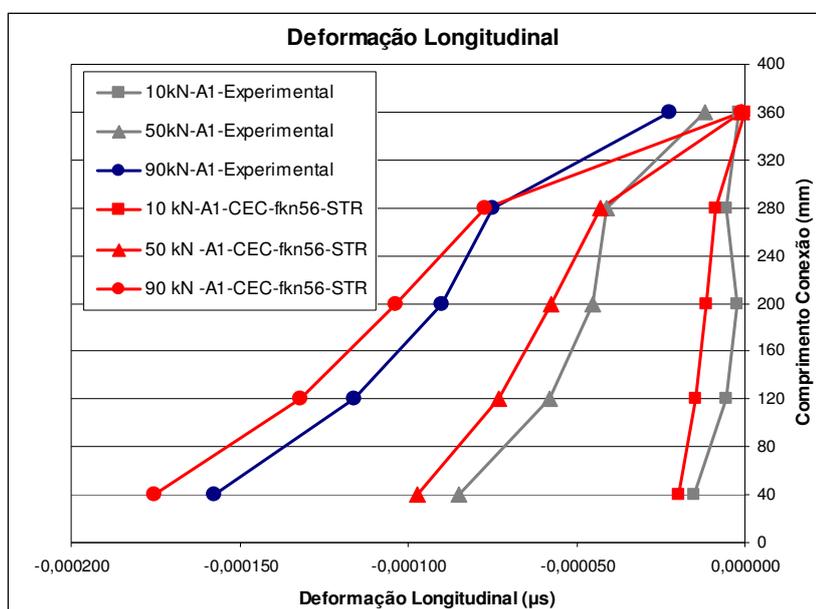


Figura 6.39 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-STR para as cargas de 10, 50 e 90 kN

Os resultados de deformações circunferenciais foram colocados na tabela 6.24 e figura 6.40.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-STR)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	0,000005	0,000017	0,000025	0,000002	0,000012	0,000021
280	0,000005	0,000023	0,000041	0,000004	0,000019	0,000034
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000003	0,000017	0,000030
120	0,000002	0,000018	0,000035	0,000003	0,000015	0,000026
40	0,000009	0,000026	0,000065	0,000005	0,000026	0,000046

Tabela 6.24 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SPA para as cargas de 10, 50 e 90 kN

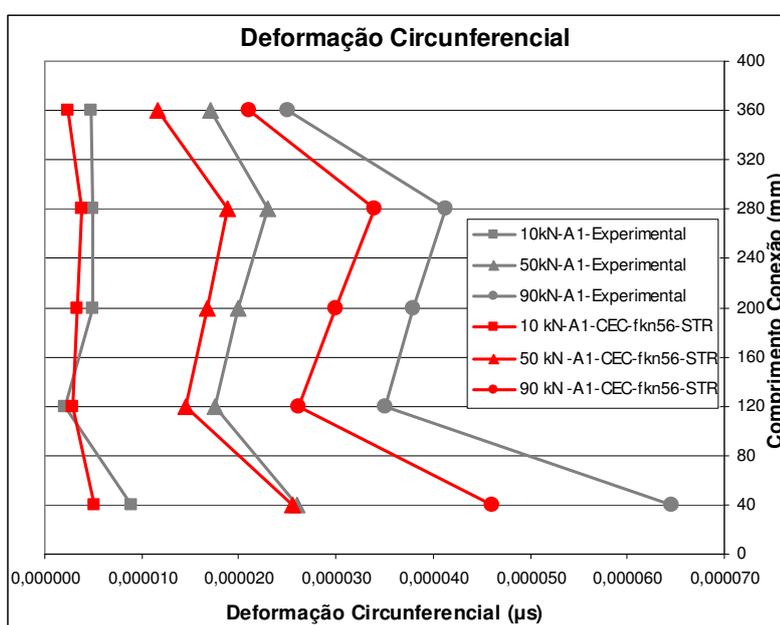


Figura 6.40 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-STR para as cargas de 10, 50 e 90 kN

Ocorreu uma aproximação dos perfis com a redução da tensão de ruptura da mistura principalmente na parte central na conexão.

c. Simulações da variação do Coeficiente de Poisson da Mistura

A simulação sugerida aqui é da variação do coeficiente de Poisson da mistura (0,25) foi levantado também nesse trabalho durante os ensaios descritos no Capítulo 3. O valor máximo de 0,4 foi encontrado para corpos-de-prova constituídos apenas da resina Epóxi.

Foi feita uma simulação numérica (A1-CEC-fkn56-SCP), mantendo o mesmo trecho sem aderência da simulação Q34, onde valor de 0,25 foi elevado para 0,4 para permitir maior flexibilidade do modelo numérico. Os resultados foram colocados na tabela 6.25 e figura 6.41.

Deformação Longitudinal						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-SCP)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	-0,000002	-0,000012	-0,000023	0,000000	0,000000	0,000000
280	-0,000005	-0,000041	-0,000075	-0,000008	-0,000042	-0,000076
200	-0,000003	-0,000045	-0,000090	-0,000011	-0,000056	-0,000102
120	-0,000005	-0,000058	-0,000116	-0,000014	-0,000071	-0,000127
40	-0,000015	-0,000085	-0,000158	-0,000019	-0,000095	-0,000170

Tabela 6.25– Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SCP para as cargas de 10, 50 e 90 kN

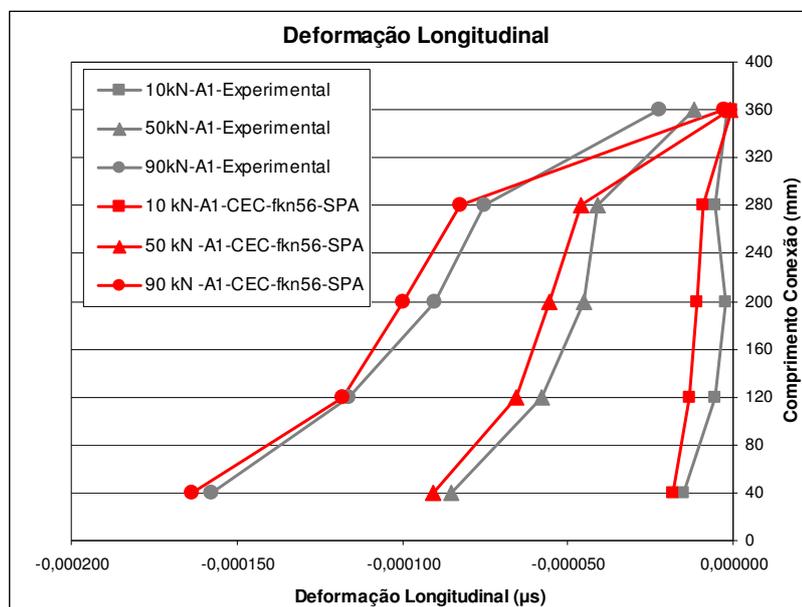


Figura 6.41 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SCP para as cargas de 10, 50 e 90 kN

O aumento do coeficiente de Poisson torna notório uma aproximação na parte central dos perfis.

Os resultados de deformações circunferenciais foram colocados na tabela 6.26 e figura 6.42.

Deformação Circunferencial						
Distância	Programa Experimental			Modelo (A1-CEC-fkn56-SCP)		
	10 kN	50 kN	90 kN	10 kN	50 kN	90 kN
360	0,000005	0,000017	0,000025	0,000003	0,000014	0,000026
280	0,000005	0,000023	0,000041	0,000004	0,000020	0,000036
200	0,000005	0,000020	0,000038	0,000004	0,000018	0,000032
120	0,000002	0,000018	0,000035	0,000003	0,000016	0,000029
40	0,000009	0,000026	0,000065	0,000004	0,000022	0,000039

Tabela 6.26 – Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SCP para as cargas de 10, 50 e 90 kN

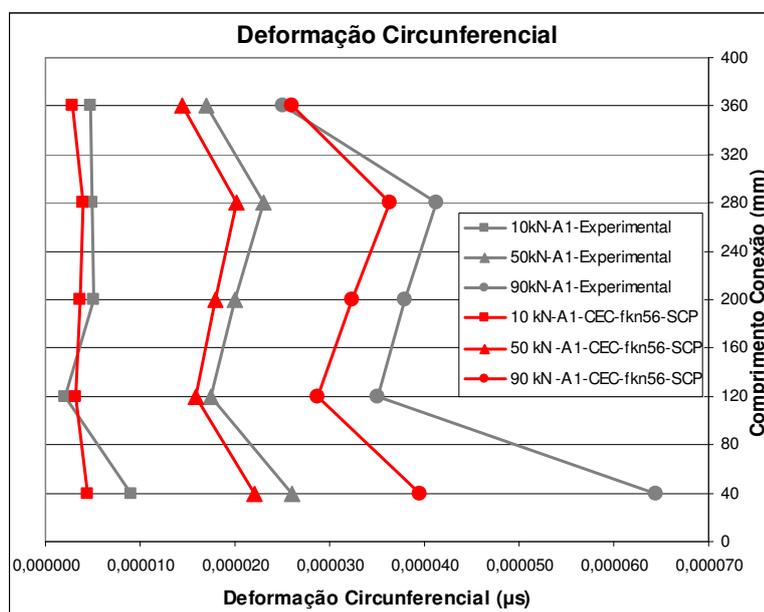


Figura 6.42 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os Resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico A1-CEC-fkn56-SCP para as cargas de 10, 50 e 90 kN

Houve uma aproximação dos perfis pois com o aumento do valor do coeficiente de Poisson a conexão ficou mais flexível permitindo maiores deformações circunferenciais.