7.Modelagem Numérica da Conexão de Reparo com Shear Keys–A2

7.1 Introdução

Com os conhecimentos obtidos na modelagem da conexão lisa (A1), foi iniciada a modelagem numérica da conexão com *shear keys* (A2).

O passo inicial dessa nova modelagem foi a análise numérica por elementos finitos com elemento de contacto, uma vez que se busca aqui não mais conhecer o comportamento de tensões e deformações desse tipo de conexão, mas sim a razão do ganho de resistência das conexões com *shear key* mostrado no Programa Experimental de Alves.

7.2 Conexão com Elemento de Contacto (A2-CEC)

O modelo numérico foi concebido com as mesmas características geométricas e propriedades mecânicas do programa experimental de Alves (1995) e as demais informações sobre o material injetado no anular (mistura) foram levantadas em laboratório, conforme o Capítulo 3.

Para a modelagem também foi utilizado o programa Ansys 10.0. Inicialmente foi realizada a modelagem sem a calibração pelo fator FKN cujo objetivo foi a busca do conhecimento dos resultados do modelo sem a calibração, mesmo sabendo que a função do fator é propiciar uma melhor condição de contacto. Posteriormente foram usados testes para a determinação dos parâmetros de calibração e geração do modelo calibrado da conexão com *shear keys*.

7.2.1 Características da Modelagem

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

Material	tubo e luva	mistura	Elemento de
	(aço)	(resina e cimento)	Contacto
Módulo de Elasticidade (E)	2,065 x 10 ⁵ MPa	4504MPa	-
Coeficiente de Poisson (v)	0,3	0,25	-
Coeficiente de atrito (µ)	-	-	0,626
Elemento de Contacto	PLANE42	PLANE42	CONTA171
Tipo de elemento	Axissimétrico		
Critério de falha	Coulomb ($\tau = C + \mu.p \leq TAUMAX$)		
TAUMAX	0,417 MPa		
$\tau_{\text{coesão}}(C)$	0,400 MPa		
Fator de Rigidez Normal (FKN)		1	

Tabela 7.1 – Parâmetros utilizados na modelagem com elemento de contacto

A conexão com *shear keys* foi modelada adotando para o parâmetro TAUMAX o mesmo valor (0,417MPa) foi calculado como a tensão média de resistência para a conexão lisa (A1). Esse valor foi calculado para o modelo analítico e encontrado no Programa Experimental de Alves 1995.

O procedimento de usar a tensão (1,526MPa) encontrada no Programa Experimental para a conexão com *shear keys* não é correto pois as propriedades do material (contacto) não foram alteradas. Caso fosse usada induziria a se realizar sempre um novo ensaio para a determinação do valor TAUMAX, o que é exatamente o que o programa de elementos finitos se propõe a fazer.

7.2.2 Comparação dos Resultados Numéricos com os Experimentais a. Diagrama Carga *versus* Deslocamento Relativo

O primeiro resultado analisado foi o deslocamento relativo e a rigidez do modelo que simulou a existência de um elemento de contacto nas interfaces dos membros tubulares sem calibração (A2-CEC), para comparação com os valores gerados no programa experimental, considerando a distância do ponto de referência na luva até o elemento no topo do tubo, conforme visto na figura 5.8.

O modelo de conexão com *shear key* (A2-CEC) gerou uma curva menos rígida no diagrama de carga *versus* deslocamento relativo, comparada com os resultados mencionados do programa experimental. Os resultados foram transcritos para a tabela 7.2 e retratados na figura 7.1.

Deslocamentos Relativos entre Modelo Experimental e o Modelo Numérico Com								
	Elemento de Contato							
Carga(kN)	Modelo Experimental	Modelo Numérico						
	Conexão A2	A2-CEC						
5	0,00	0,04227						
10	0,00	0,07391						
20	0,03	0,11351						
30	0,04	0,14265						
40	0,06	0,16976						
50	0,07	0,19424						
60	0,08	0,21950						
70	0,09	0,24813						
80	0,10	0,27991						
90	0.12	0.33906						

Tabela 7.2 – Deslocamentos relativos entre os resultados dos programas experimentais e os dos modelos numéricos da conexão com *shear keys* (não-calibrado).



Figura 7.1 – Comparativo entre deslocamentos relativos.

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. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 6.6.

Rigidezes Axiais Calculadas dos Modelos do Programa Experimentais e do Modelo					
	Numérico				
	com Elemento de Contato	(A2-CEC)			
Carga	Modelo Experimental	Modelo Numérico			
(kN)	Conexão A2	A2-CEC			
5	0	158,05529			
10	333,3333	252,53418			
20	1000	343,06494			
30	500	368,86758			
40	1000	408,54680			
50	1000	395,94552			
60	1000	349,23517			
70	1000	314,70292			
80	500	169,06171			
90	750	265,44209			

Tabela 7.3 – Rigidezes Axiais calculadas do modelo do Programa Experimental de Alves e modelo numérico com elemento de contacto (CEC).



Figura 7.2 – Diagrama comparativo entre rigidezes axiais

Os diagramas de deslocamento relativo e de rigidez axial mostram que o modelo com elemento de contato (A2-CEC) é muito mais flexível que seus correspondentes modelos (experimental e analítico).

A curva de deslocamentos relativos pela carga não apresenta a mesma rigidez do seu correspondente modelo experimental. O diagrama mostra que a o modelo gerado é mais resistente que o modelo de luva lisa. Fica pressuposto uma falha da mistura confinada entre o tubo e a luva.

Por fim o modelo gerado rompeu com carga de 93,75kN, bem inferior ao seu correspondente modelo experimental. O modelo numérico obedeceu ao critério de falha estabelecido (Coulomb $\tau = C + \mu.p \leq TAUMAX$) e os parâmetros característicos de contacto.

c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformações

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos de deformação Longitudinal e Circunferencial entre o modelo numérico com elemento de contato (A2-CEC) e os registros do Programa Experimental de Alves. Como mencionado no item 4.2.2 a face externa da luva foi instrumentada com cinco *strain gauges* que foram dispostos conforme a figura 7.3 abaixo:



Figura 7.3 – Desenho esquemático do posicionamento dos *strain gauges* colados na superfície externa da luva e dos *shear keys* internos à 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 máxima de 90 kN foi a escolhida por ser mais próxima da carga de ruptura do modelo numérico.

As comparações estão exibidas nas tabelas 7.4 e 7.5 seguidas pelos diagramas correspondentes.

- Diagrama deformação longitudinal: Apesar da aproximação da ordem de grandeza dos resultados do programa experimental, as deformações captadas nos nós próximos à posição do *strain gauge* da conexão foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves. A tabela 7.4 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 7.4 mostra os perfis dentre os resultados para comparação.

A tabela 7.4 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. A figura 7.4 mostra os perfis dentre os resultados para comparação.

Deformação Longitudinal						
	Progr	Programa Experimental			Iodelo (A2-CI	EC)
Posição	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
360	-0,000010	-0,000010	-0,000012	-0,000003	-0,000022	-0,000035
280	-0,000012	-0,000050	-0,000110	-0,000006	-0,000032	-0,000056
200	-0,000015	-0,000080	-0,000140	-0,000012	-0,000059	-0,000109
120	-0,000018	-0,000100	-0,000170	-0,000014	-0,000069	-0,000126
40	-0,000020	-0,000130	-0,000230	-0,000017	-0,000084	-0,000152

Tabela 7.4 – Resultados de deformação longitudinal lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN



Figura 7.4 - 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 (A2-SEC) apresentou também aproximação dos resultados do programa experimental, mas de modo geral, o modelo numérico foi mais rígido que o modelo experimental, principalmente nos nós a 40, 200 e 360 mm, ou seja, onde foram modelados os shear keys correspondentes do Programa Experimental de Alves. A redução das deformações citadas é coerente pois os shear keys reforçam as regiões reduzindo assim as deformações nesses locais.

Deformação Circunferencial						
	Progr	ama Experin	nental	Мо	delo (A2-Cl	EC)
Posição	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
360	0,000010	0,000035	0,000055	0,000000	0,000001	0,000001
280	0,000011	0,000040	0,000058	0,000003	0,000012	0,000023
200	0,000009	0,000025	0,000040	-0,000001	-0,000002	-0,000003
120	0,000008	0,000020	0,000032	0,000003	0,000019	0,000030
40	0,000012	0,000055	0,000090	-0,000001	-0,000002	0,000002

Tabela 7.5 - Resultados de deformação circunferencial lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN



O diagrama 7.5 mostra os perfis dos resultados para comparação.

Figura 7.5 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico deformação circunferencial lidos no Programa Experimental de Alves e nos nós do modelo numérico calibrado para as cargas de 10, 50 e 90 kN

7.2.3 Análise de Tensões do Modelo Numérico

a. Diagrama de Tensões Cisalhantes

Como anteriormente, foram gerados perfis de tensões de cisalhantes (σxy) 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 7.6 – Localização dos perfis de cisalhamento (azul) interface tubo mistura, (verde) interface mistura/luva e (vermelho) no centro da mistura

O diagrama da figura 7.7 exibe a tensão de cisalhamento nos perfis mostrados na figura acima. A baixa rigidez do modelo numérico mantém as tensões irregulares. As informações levantadas no laboratório durante esse trabalho não foram compatíveis com as informações do programa experimental de modo que pudessem reproduzir a mesma rigidez e deslocamentos relativos. A curva tensão-deformação gerada no laboratório apresentou maiores resistência e módulo de elasticidade.



Figura 7.7 – Diagrama de perfis de cisalhamento nas interfaces tubo/mistura (Pt), mistura/luva (Pl) e no centro da mistura (Pm), aplicando-se carga de 93,75kN.

Analisando o diagrama da figura 7.7, 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.

Com a interrupção do processamento na carga de 93,75kN, devido à detecção de um movimento de corpo rígido, foi observado que no perfil tubo (Pt) grande parte da conexão possui tensões acima da tensão limite de resistência (0,417MPa, para 95kN) indicando que esse trecho não resiste ao cisalhamento e o deslizamento entre os membros tubulares da interface tubo/mistura é eminente, mesmo com a carga pouco menor que a da ruptura da conexão lisa.

Observa-se também que as tensões cisalhantes, nas regiões fora dos *shear keys*, na luva ficaram abaixo do valor de 0,355MPa, indicando uma reserva de resistência ao deslizamento e que os *shear keys* atuam suportando a reação ao carregamento da mistura sem aderência.

b. Diagrama de Tensões Radiais

Na figura 7.8 é verificado que os perfis apresentam-se irregulares devido a baixa rigidez do modelo. A imagem mostra também que a região localizada acima do *shear key* posicionado na cota 200 mm está sujeita a esforços de tração e a região abaixo dessa cota está sujeita à esforços de compressão, comportamentos oriundos de um binário. Já nas áreas dos *shear keys* ocorrem esforços concentrados de tração e compressão.



Figura 7.8 – Diagramas de perfis radiais nas interfaces tubo/mistura (Pt), mistura luva (Pl) e no centro da mistura (Pm) do modelo numérico da conexão com shear keys, com elemento de contacto (A2-CEC), aplicando-se cargas de 93,75kN.

Esses resultados não podem ser totalmente abonados pois não há informações que os respaldem. Entretanto, mesmo na condição de "não-calibrado", já sinalizam que, com a presença dos *shear keys*, houve um acréscimo de resistência.

7.3 Ajuste do Modelo Numérico Com Elemento de Contato (A2-CECfkn56)

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. Assim como no modelo de conexão lisa, foi realizada uma calibração visando obter melhorias no modelo numérico procurando ajustá-lo aos resultados do Programa Experimental de Alves. A melhoria pretendida também 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.

Prosseguindo com a seqüência da análise do modelo com os recursos da modelagem pelo programa Ansys 10.0, foi feita uma melhoria na condição de contacto, conforme o modelo da conexão lisa (A1-CEC-fkn56), calibrando através da constante real FKN definida como o fator de rigidez normal ao contacto. Foi adotado para o modelo da conexão com *shear keys*, o mesmo valor de FKN usado anteriormente para a conexão lisa, ou seja, FKN igual a56.

7.3.1 Características da Modelagem

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

Material	tubo e luva	mistura	Elemento de	
	(aço)	(resina e cimento)	Contacto	
Módulo de	2,065 x 10 ⁵ MPa	4504MPa	-	
Elasticidade (E)				
Coeficiente de	0,3	0,25	-	
Poisson (ν)				
Coeficiente de atrito	-	-	0,626	
(µ)				
Elemento de Contacto	PLANE42	PLANE42	CONTA171	
Tipo de elemento	Axissimétrico			
Critério de falha	Coulomb ($\tau = C + \mu.p \leq TAUMAX$)			
TAUMAX	0,417 MPa			
$\tau_{coesão}$ (C)	0,400 MPa			
Fator de Rigidez Normal	56			
(FKN)				

Tabela 7.6 - Parâmetros utilizados na modelagem com elemento de contacto

144

7.3.2 Comparação dos Resultados Numéricos com os Experimentais

a. Diagrama Carga versus Deslocamento Relativo

Os resultados para o modelo calibrado de conexão com *shear keys* (A2-CEC-fkn56) são mostrados no diagrama da figura 7.9, cujos valores estão na tabela 7.7.

Deslocamentos Relativos do Modelo					
Carga(kN)	Experimental e uo iviouelo Analitico Calibrado (A2-CEC-IR (kN) Modelo Experimental Modelo Nur				
Curgu(Kiv)	(Shear Key)	(A2-CEC-fkn56)			
5	0,00	0,00419			
10	0,00	0,00882			
20	0,03	0,01803			
30	0,04	0,02722			
40	0,06	0,03641			
50	0,07	0,04564			
60	0,08	0,05500			
70	0,09	0,06508			
80	0,10	0,07607			
90	0,12	0,08869			

Tabela 7.7 – Deslocamentos relativos entre os resultados do modelo experimental e do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56.



Figura 7.9 – Diagrama comparativo entre deslocamentos relativos

O diagrama de carga *versus* deslocamento relativo mostra que a curva gerada apresenta uma não-linearidade causada pelas propriedades do elemento de contacto (*CONTA171*).

b. Diagrama Carga versus Rigidez Axial

Quanto a rigidez axial, novamente foi calculada pela formula 5.16, e comparada com o resultado calculado para o modelo do Programa Experimental de Alves. Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 7.8 e na figura 7.10.

Rigidezes Axiais Calculadas dos Modelos do Programa Experimentais e do					
	Calibrado (A2-CEC-	fkn56)			
Carga(kN)	Modelo Experimental	Modelo Numérico			
	Conexão A2	A2-CEC-fkn56			
5	0	1079,9136			
10	333,3333	1085,7763			
20	1000	1088,1393			
30	500	1088,1393			
40	1000	1083,4236			
50	1000	1068,3761			
60	1000	992,0635			
70	1000	909,9181			
80	500	792,3930			
90	750	1014,7705			

Tabela 7.8 – Rigidezes Axiais calculadas do modelo do Programa Experimental de Alves e modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56.



Figura 7.10 – Diagrama comparativo entre rigidezes axiais

Diagrama carga *versus* rigidez axial apresentou valores calculados próximos para os modelos, destacando a não-linearidade para o modelo numérico.

c. Diagrama Comprimento da Conexão versus Deformações

De posse dos resultados das leituras de deformação Longitudinal e Circunferencial obtidas nos *strain gauges* do Programa Experimental de Alves foi feita uma comparação com os valores de deformação lidos nos nós do modelo estudado (A2-CEC-fkn56). 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 do modelo numérico calibrado.

Como mencionado no item 4.2.2 a face externa da luva foi instrumentada com cinco *strain gauges* que foram dispostos conforme a figura 7.11 abaixo:



Figura 7.11 – Desenho esquemático do posicionamento dos *strain gauges* colados na superfície externa da luva e dos *shear keys* internos à luva.

Os resultados das análises mostram que as deformações geradas no modelo numérico têm ordem de grandeza de valores próximos dos resultados do modelo experimental. As comparações estão exibidas nas tabelas e figuras a seguir.

- Diagrama deformação longitudinal: Apesar da aproximação da ordem de grandeza dos resultados do programa experimental, as deformações captadas nos nós próximos à posição do *strain gauge* da conexão foram menores que as lidas no Programa Experimental de Alves. Em relação ao modelo não calibrado (A2-CEC) o novo modelo gerou perfis com menores variações. A tabela 7.9 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 7.12 mostra os perfis dentre os resultados para comparação.

	Deformação Longitudinal					
	Prog	Programa Experimental			elo (A2-CEC	-fkn56)
Distância	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
360	-0,000010	-0,000010	-0,000012	-0,000003	-0,000018	-0,000031
280	-0,000012	-0,000050	-0,000110	-0,000007	-0,000034	-0,000053
200	-0,000015	-0,000080	-0,000140	-0,000010	-0,000052	-0,000092
120	-0,000018	-0,000100	-0,000170	-0,000013	-0,000067	-0,000121
40	-0,000020	-0,000130	-0,000230	-0,000017	-0,000085	-0,000153

Tabela 7.9 – Resultados de deformação longitudinal lidos no Programa Experimental de Alves e do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN



Figura 7.12 – Diagrama comparativo das deformações longitudinais entre os resultados lidos no Programa Experimental de Alves e os do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN

- <u>Diagrama deformação circunferencial</u>: O modelo numérico (A2-SECfkn56) apresentou também aproximação dos resultados do programa experimental, mas de modo geral, o modelo numérico foi mais rígido, principalmente nos nós a 40, 200 e 360 mm, ou seja, onde foram modelados os *shear keys* correspondentes do Programa Experimental de Alves. A redução das deformações citadas continua coerente pois os *shear keys* reforçam as regiões reduzindo assim as deformações nesses locais. Contudo, o modelo numérico calibrado produziu deformações maiores nos perfis em relação ao modelo não calibrado.

A tabela 7.10 mostra as deformações registradas e as lidas nos nós do modelo numérico. O diagrama 7.13 mostra os perfis d=entre os resultados para comparação.

Deformação Circunferencial						
	Programa Experimental			Modelo (A2-CEC-fkn56)		fkn56)
Posição	10kN	50kN	90kN	10kN	50kN	90kN
360	0,000010	0,000035	0,000055	0,000001	0,000007	0,000014
280	0,000011	0,000040	0,000058	0,000003	0,000016	0,000028
200	0,000009	0,000025	0,000040	0,000002	0,000010	0,000017
120	0,000008	0,000020	0,000032	0,000003	0,000016	0,000029
40	0,000012	0,000055	0,000090	0,000001	0,000007	0,000013

Tabela 7.10 – Resultados de deformação circunferencial lidos no Programa Experimental de Alves e do modelo numérico calibrado A2-CEC-fkn56 para as cargas de 10, 50 e 90 kN



Figura 7.13 – Diagrama comparativo das deformações circunferenciais entre os resultados lidos no Programa Experimenta I de Alves e os do modelo numérico A1-CEC para as cargas de 10, 50 e 90 kN Em seguida foram gerados os perfis de tensões para as comparações com o modelo do programa experimental.

7.3.3 Análise de Tensões do Modelo Numérico

a. Diagrama de Tensões Cisalhantes

Na seqüência de levantamento de informações para o modelo da conexão lisa calibrada (A2-CEC-fkn56), foram traçados diagramas de tensões cisalhantes 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. Os dados para os diagramas foram coletados na interface tubo/mistura (Pt) (medido no tubo), mistura/luva (Pl) (medido na luva) e no centro da mistura (Pm), conforme a figura a seguir:



Figura 7.14 – Localização dos perfis de cisalhamento (azul) interface tubo/mistura, (verde) interface mistura/luva e (vermelho) no centro da mistura

Apesar da geometria diferenciada pela presença dos *shear keys*, foi considerada a tensão limite de resistência da conexão ao cisalhamento na interface tubo/mistura (0,417MPa), calculada pela fórmula 4.4, e que é a maior tensão uniforme equivalente de cisalhamento entre os três perfis gerados, uma vez que possui a menor área radial. Esse valor é menor que o valor encontrado no programa experimental (1,526MPa), porém é ressaltado aqui que na formulação fora feita para uma conexão lisa.

Sendo que as propriedades dos materiais para esse modelo foram as mesmas usadas para o modelo numérico da conexão lisa (A1), estimava-se que o modelo com *shear keys*, por ter uma geometria diferente, fosse romper com uma carga bem superior ao modelo de conexão lisa, pois segundo dados do programa experimental o modelo com *shear keys* suportou até a carga de 320 kN antes de se romper. Contudo o processamento foi interrompido automaticamente por detecção de movimento de corpo rígido com carga de 95 kN, ou seja, interrupção do processamento computacional da análise numérica assim que ocorre movimento de corpo rígido. Mesmo com a interrupção do programa, os dados processados até a carga de 95 kN ficam válidos e com esses dados foi feito o diagrama de tensões cisalhantes.



O diagrama a seguir exibe os perfis de tensão de cisalhamento posicionados segundo a figura 7.14:

Figura 7.15 – Diagrama de tensão cisalhante do modelo calibrado (A2-CEC-fkn56) onde são mostrados os perfis de cisalhamento nas interfaces tubo /mistura (Pt), com os limites de resistência por coesão ou Perda de Aderência (0,400MPa) e limite de resistência ao deslizamento ou Atrito (0,417MPa) quando aplicada a carga de 95kN.

A comparação entre os perfis de cisalhamento no diagrama mostra que nas tensões cisalhantes são maiores na interface tubo/mistura (**Pt**) devido à menor área radial.

O perfil de cisalhamento **Pt** mostra os pontos de falha quando vencidos os limites de resistências de aderência (0,400 MPa) e do atrito (0,417MPa), indicando a região da conexão ainda resistente à falhas.

Nos trechos do perfil **PI**, fora dos picos de influência dos *shear keys* a resistência da mistura é formada pelas parcelas de aderência e atrito. Nas regiões dos shear keys a parcela de resistência da mistura se deve ao esforço de compressão que a mistura exerce sobre o *shear key*,

Uma vez que é perdida a aderência e é vencido o atrito entre os membros tubulares, a mistura exerce compressão sobre os *shear keys*, onde se apóia para continuar a resistir ao deslizamento dos membros tubulares.

b. Diagrama de Tensões Radiais

Como seqüência nos dados levantados foi elaborado um diagrama de tensões radiais onde é possível se verificar que o trecho superior da conexão entre 200 e 381 mm este submetido à tração e o trecho inferior da conexão entre 0 e 200 mm submetido à compressão.



Figura 7.16 – Diagrama de tensão radial do modelo calibrado (A2-CEC-fkn56) onde são mostrados os perfis radiais tubo/mistura (Pt), mistura (Pm) e mistura/luva (Pl), quando aplicada a carga de 95kN.

Nos perfis acima é constatado a redução das variações dos perfis com a calibração da condição de contacto, aumentando a rigidez no modelo.

7.3.4 Avaliação dos Resultados Segundo o Critério de Falha

Foi realizada uma verificação dos dados gerados pelos modelos numéricos para a conexão lisa (A1) quanto ao critério de falha de Coulomb visto no item 6.3.3. foi verificado que a conexão não-calibrada (A2-CEC) possui uma tensão de compressão normal média (p) de 0,02656MPa e o modelo calibrado (A2-CEC-fkn56) possui uma tensão de compressão normal média (p) de 0,03539MPa, que continuam sendo valores muito pequenos.

Comparando o valor calculado onde (p) foi de 0,02716MPa, é visto que a calibração poderia ter melhorado a condição de contacto do modelo se fosse aplicado um fator FKN menor que o usado para o modelo não calibrado.

As razões para a diferença dos valores encontrados estão centradas na influência que os *shear keys* exercem sobre o sistema em equilíbrio, onde os mesmos provocam tensões de compressão sobre a interface tubo/mistura.

A componente relativa à resistência ao deslizamento, uma vez que é perdida a aderência e vencida a força de atrito, está associada às forças concentradas de compressão que surgem perpendiculares às faces dos *shear keys* no momento em que o tubo é carregado e tende a deslizar. Mesmo em tubo liso, existe o efeito da apoio nas paredes devido às irregularidades superficiais decorrentes do processo de laminação.

Conforme visto no item 2.1.2, o levantamento de tensões originárias das resultantes de compressão sobre reforços como os *shear keys* dependem das propriedades mecânicas da mistura confinada quando está submetida à compressão além da superfície que está aderida (rugosidade, reforços etc). (Fernandes & Debs 2005)

7.4 Análise do Comportamento dos Shear Keys

Observando os resultados dos perfis da ZONA-2, mostrados na figura 4.48, foram feitas análises sobre o comportamento da conexão e as contribuições que os *shear keys* podem trazer ao conjunto em termos de aumento de resistência.



Figura 7.17- Diagrama com curvas dos perfis de cisalhamento no tubo (Pt), na mistura (Pm) e na luva (Pl) para a carga de 95 kN. Subdivisão das regiões estudadas.

Inicialmente a ZONA-2 foi subdividida pelo comprimento da conexão em regiões para a análise:

REGIÃO	Comprimento a conexão
А	0 até 50
В	50 até 200
С	200 até 350

Tabela 7.11 – Subdivisão da ZONA-2 para análises dos shear keys

As análises foram feitas principalmente sobre as regiões B e C onde se buscou as explicações para o comportamento diferenciado de tensões na interface tubo/mistura.

REGIÃO A (0 até 50mm)

A região compreende o *shear key* junto à base da ZONA-2. Através do programa Ansys 10.0 foi gerado um desenho da condição do contacto onde é mostrada a região A junto à base da conexão. É observado que a interface tubo/mistura, para a carga de 95 kN, está sujeita ao deslizamento (*Sliding*), isto é, os limites de resistência de aderência e de atrito estático já foram ultrapassados. Na interface mistura/luva é mostrado que a área está sujeita à aderência (*Sticking*).



Figura 7.18- Condições do contacto durante a aplicação da carga de 95 kN. É mostrado que a interface tubo/mistura está sujeita deslizamento (*Sliding*) e na interface mistura/luva perdura a aderência (*Sticking*)

Essa região é a mais propícia de ocorrência de movimento de corpo rígido pois a base do tubo tende a se soltar da mistura pelo efeito do momento binário.

Em seguida foi traçado a figura com a penetração do contacto que indica o quanto o elemento de contacto está penetrando no elemento base (*target*), se houver compressão sobre o contacto.

A interface mistura/luva apresenta indicação de tensão de compressão sobre as superfícies dos *shear keys*. A reação a essa compressão sobre o *shear keys* gera tensões sobre a interface oposta.

A figura mostra que a interface tubo/mistura está submetida à compressão, mesmo com tensões acima dos limites de resistência de aderência e de atrito.



Figura 7.19- Desenho mostrando as áreas sujeitas à compressão na região A (escala real)



Figura 7.20 - Desenho mostrando as áreas sujeitas à compressão na região A escala calculada pelo programa ANSYS 10.0 para permitir distorções do desenho o que possibilita mostrar a tendência de deformações no modelo)

REGIÃO B (50 até 200mm)

Essa região está compreendida entre o *shear key* junto à base da conexão e o *shear key* próximo do centro da conexão. Para a carga de 95 kN, o desenho de condição de contacto mostra que na interface tubo/mistura a maior parte da região está sujeita ao deslizamento (*Sliding*). Devido à influência causada pelo *shear key* (SK3) junto à base da conexão, a mesma interface ainda possui resistência de aderência localizada entre os *shear keys* da região (SK2 e SK3).



Figura 7.21- Exibição das condições do contacto durante a aplicação da carga de 95kN. É mostrado que a maior parte da interface tubo/mistura está sujeita deslizamento (*Sliding*) e na interface mistura/luva perdura a aderência (*Sticking*)

Apesar de o modelo numérico calibrado ter falhado por movimento de corpo rígido na carga de 95 kN, foi possível mostrar na figura que existe um trecho da interface tubo/mistura sujeita à aderência. Essa indicação surgiu pela precisão e detalhamento do programa Ansys 10.0

Executando a mesma seqüência da análise, também foi gerada uma figura com a penetração do contacto.



Figura 7.22- Desenho mostrando as áreas sujeitas à compressão na região B

A figura mostra que a área em contacto na interface tubo/mistura, entre os *shear keys* não apresenta pressão de contacto, a não ser pressão localizada pela influência do *shear key* (SK3) junto à base da conexão.

Foi verificado que, sobre a interface tubo/mistura, próximo do *shear keys* central (SK2) da conexão existe um pico de penetração indicando um acréscimo de tensão de compressão, maior do que o do *shear keys* da base (SK3). As demais áreas da interface ficaram sujeitas ao deslizamento.

A interface mistura/luva também apresenta indicação de tensão de compressão exercida pela mistura ao se apoiar sobre as superfícies dos *shear keys*. A reação a essa compressão sobre o *shear keys* na interface mistura/luva também gera tensões sobre a interface oposta.

REGIÃO C (200 até 350mm)

Essa região está compreendida entre o *shear key* próximo do centro da conexão (SK2) e o *shear key* do topo da conexão (SK1). Para a carga de 95kN, a figura de condição de contacto mostra que a interface tubo/mistura na região está sujeita ao deslizamento (*Sliding*).



Figura 7.23- Condições do contacto durante a aplicação da carga de 95kN. É mostrada a área está sujeita ao deslizamento (*Sliding*) na interface tubo/mistura.

A interface mistura/luva também apresenta indicação de tensão de compressão exercida pela mistura ao se apoiar sobre as superfícies dos *shear keys*, conforme já visto na seção anterior.

Executando a mesma seqüência da análise anterior, também foi gerada a figura com a penetração do contacto. É mostrado que próximo aos *shear keys* da conexão, na interface tubo/mistura, existe um pico de penetração indicando um acréscimo de tensão de compressão.



Figura 7.24- Desenho mostrando as áreas sujeitas à compressão na região C

Na região entre os shear keys é mostrado que as tensões de cisalhamentos atuantes na interface tubo/mistura não ultrapassaram os limites de resistência de aderência e de atrito. Essa resistência é produzida pelo momento binário que produz compressão da mistura sobre o tubo.

A figura também mostra que existe compressão sobre a interface tubo/mistura oriunda da interface oposta. Essa compressão é originada da resultante de reações provocadas pelo apoio da mistura sobre as superfícies dos *shear keys*. Com esse apoio a mistura encontra uma ancoragem, ou seja, uma interfixação entre os *shear keys*.

A cada passo que se aumenta o carregamento sobre o topo do tubo, a luva reage aumentando a compressão do *shear keys* sobre a mistura ancorada e essa comprime com força normal a interface oposta, aumentando assim o atrito estático sobre a interface tubo/mistura.

7.4.1 Mecanismo de Funcionamento dos Shear keys

Foi visto no final do Capítulo 6, item 6.5, que após vencida a força de atrito se inicia a perda de aderência na interface tubo/mistura. Foi visto também que em decorrência do mecanismo de redistribuição de tensões, inicia-se a perda de aderência também na interface mistura/luva que uma vez iniciada cresce até atingir uma fase em que essa perda é contínua conforme prosseguir o carregamento. Uma vez iniciado essa perda contínua de aderência, a mistura, confinada entre os tubulares de aço, passa a se apoiar sobre as superfícies dos shear keys. A resistência devido ao atrito é pequena quando comparada à resistência de apoio desenvolvida na interface mistura/luva.

Em uma análise das tensões desenvolvidas em torno dos *shear keys*, concluiu-se que as tensões (R) de reação da luva ao carregamento no tubo gera tensões de compressão sobre às superfícies dos *shear keys*, ou seja, a mistura se apóia sobre os *shear keys*. As componentes dessa reação R, perpendiculares à superfície do shear keys, incidem sobre a superfície do tubo exercendo esforços de compressão na interface tubo/mistura que contribuem para o aumento da resistência pelo atrito. Esse comportamento foi mostrado no item 7.4.



Figura 7.25 – Esquema mostrando as forças e reações que atuam sobre a superfície dos *shear keys*

O atrito estático, causa aumento da resistência de aderência através do aumento da resistência ao cisalhamento que ocorre na interface tubo/mistura, conforme a expressão de Coulomb:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C} + \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{N} \quad (7.1)$$

A resistência de aderência das conexões com *shear keys* é, inicialmente, devida à coesão que é perdida na interface tubo/mistura, iniciando-se então o atrito estático entre o tubo e a mistura.

O apoio da mistura gera uma força normal à parede do tubo conforme a fórmula abaixo e mostrado no perfil de pressão de contato versus comprimento da conexão para a carga de 90 kN



$$\mathbf{N} = \mathbf{t.cos}\boldsymbol{\theta} \quad (7.2)$$

Figura 7.26 – Esquema mostrando as regiões na interface tubo/mistura sob influência da ação da componente (t) que age comprimindo a superfície.

As observações acima sobre o funcionamento estão de acordo com o estudo do item 2.1.2, "Mecanismo de aderência". (Fernandes & Debs, 2005).