

6

Análise determinística e probabilística de fechamento e plastificação

6.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre análises probabilísticas em mecânica das rochas salinas e, em seguida, a aplicação de uma metodologia probabilística a uma análise numérica de fluência. Para isso, é considerando um modelo sintético de poço revestido representando um desafio característico do pré-sal brasileiro.

Deseja-se avaliar a evolução do fechamento do sal e do estado de tensão do revestimento metálico ao longo da vida útil do poço. Ao mesmo tempo, como condição pré-estabelecida do modelo, é avaliado o efeito da imperfeição na seção transversal do poço – esse é considerado elipsoidal, ou ovalizado – e da ausência de cimentação preenchendo o anular. No campo, esses cenários reproduzem a ocorrência de cavidades devidas à dissolução ou fragmentação da parede do poço, que não somente prejudicam a geometria da seção, como a qualidade da cimentação, conforme mostra o item 2.8.

Para este estudo são considerados os dois modelos constitutivos mais apropriados para análises de longo prazo e que apresentaram melhor desempenho nos exemplos de validação (capítulo 5): Modelo de Duplo Mecanismo e Modelo de Multi Mecanismo. Para o último modelo, são adotados os parâmetros de fluência secundária calibrados a partir da interpretação micromecânica dos dados de laboratório (configuração MMM-A).

A seguir, são empregados métodos probabilísticos para obtenção da superfície de resposta dos fenômenos em questão, julgando a probabilidade de ocorrência dos resultados determinísticos e avaliando a sensibilidade dos principais parâmetros de entrada das análises de fluência.

6.2. Análises probabilísticas em geomecânica das rochas salinas

A engenharia convencional utiliza-se de metodologias de projeto baseadas em idealizações de comportamento formuladas com parâmetros de entrada, que são processados e geram um resultado final, que pode ou não atender a requisitos de utilização e segurança estipulados. Entretanto, parâmetros físicos intrínsecos ou diretamente associados a fenômenos ou propriedades dos materiais analisados, como resistência, deformação, fluxo, dentre outros, não são valores fixos – e consequentemente, as conclusões obtidas a partir desses parâmetros não são fixas, ou determinísticas. Resultados determinísticos fornecem um referencial de grandeza do que se propõe analisar.

Uma maneira de formular numericamente a variabilidade dos parâmetros é o emprego de métodos estatísticos e probabilísticos, de modo que uma distribuição de valores dentro de limites consistentes represente a variação quantitativa pretendida – um modelo matemático. Esse é o conceito de variável aleatória (Thacker *et al.*, 1996).

Segundo Harr (1977), a aplicação de métodos probabilísticos em análises de engenharia pressupõe o atendimento de duas premissas mutuamente dependentes. A primeira delas é que o problema matemático pode ser representado por um problema probabilístico. Ao mesmo tempo, o problema probabilístico tem uma solução experimental (ou numérica) associada.

O emprego da probabilidade e da estatística nas engenharias tradicionais foi iniciada por Freudenthal (1947, 1956, 1966 *apud* Wu, 1984) em ensaios de fadiga, na mecânica dos sólidos. Em engenharia civil, as publicações clássicas de Benjamin & Cornell (1970), Ang & Tang (1975) e Harr (1987) aplicaram esse tipo de metodologia em problemas usuais de estruturas e, eventualmente, em geotecnia.

Segundo Beacher & Christian (2003), ensejado pelo êxito na área estrutural, o emprego de probabilidade e confiabilidade em geotecnia iniciou-se na década de 70, sobretudo após a ruptura da barragem de Teton, em 1976, nos Estados Unidos. A construção de repositórios geológicos para descarte de rejeitos nucleares também foi um importante incentivador de análises de risco. Whitman (1984) publicou um trabalho clássico sobre avaliação de risco em engenharia geotécnica, na qual expõe uma completa introdução ao emprego de probabilidade e

confiabilidade e apresenta estudos de caso em estabilidade de taludes e liquefação de solos.

A engenharia aeroespacial foi outro ramo que promoveu a associação de probabilidade com as análises usuais de engenharia, bem como a apresentação de métodos probabilísticos mais eficientes e menos dispendiosos computacionalmente, uma vez que o Método de Monte Carlo, considerado um método exato, poderia tornar-se proibitivo computacionalmente em análises envolvendo modelos mais complexos (Fossum & Fredrich, 2007). Outro avanço foi o advento das análises de confiabilidade, que são uma continuação natural das análises probabilísticas. Wu (1984), em sua tese de doutorado, apresentou métodos eficientes para análises de confiabilidade, sendo o precursor dos métodos de Valor Médio (*Mean Value Methods*) apresentados no fim da década de 80 por Wu *et al.* (1990). O *Southwest Research Institute* (SwRI) destacou-se nessa área com programa NESSUS[®], vinculado a NASA²⁶ e a LANL²⁷, que realiza análises probabilísticas e de confiabilidade em aplicações de engenharia, matemática e similares.

Além da interface autoexplicativa, as funcionalidades desse programa devem ser ressaltadas, à exemplo da interface direta com programas comerciais de elementos finitos, como ABAQUS[®] e ANSYS[®] e da possibilidade de simplesmente ler um arquivo de resposta a critério do usuário, permitindo a utilização externa (desvinculada) de qualquer programa para o processamento das análises. A Figura 6.1 apresenta as principais telas do NESSUS[®] durante a formulação do problema probabilístico.

Autores dos referidos instituto e programa têm publicado diversos trabalhos apresentando análises probabilísticas em engenharia com as funcionalidades do NESSUS[®] (Wu *et al.*, 1990; Thacker *et al.*, 1996; Riha *et al.*, 2000).

²⁶ *National Aeronautics and Space Administration* – Indústria aeroespacial.

²⁷ *Los Alamos National Laboratory* – Indústria de armas nucleares.

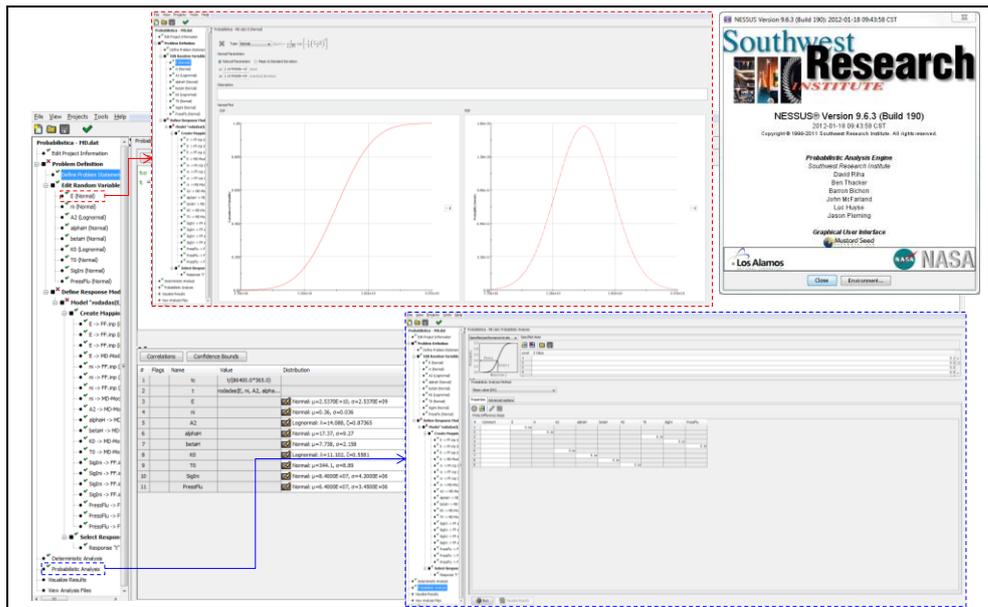


Figura 6.1 - Telas do programa NESSUS.

Na geotecnia convencional, o emprego de análises probabilísticas e de sensibilidade tornou-se usual, sobretudo na área de estabilidade de taludes – atualmente, alguns dos principais programas comerciais de estabilidade de taludes, dos grupos *Geo-Slope International Ltd.* (*Slope-W*[®]), *Rocscience Inc.* (*Slide*[®]) e *SoilVision Systems Ltd.* (*SV-Slope*[®]) dispõem de metodologias probabilísticas implementadas. O leitor interessado na aplicação de probabilidade à geotecnia convencional poderá reportar-se a Baecher & Christian (2003).

Em geomecânica do petróleo, haja vista a inerente complexidade, o uso de análises probabilísticas ainda é pouco frequente. Na área de reativação de falhas, abertura e comunicação de reservatórios, podem ser citados os trabalhos recentes de Pereira *et al.* (2012) e Carvalho (2012), no contexto do Instituto Tecgraf. Em poços ou estruturas análogas, podem ser citados os trabalhos de Fossum *et al.* (1991), Fossum & Munson (1996), Holzberg (2001), Fontoura *et al.* (2002), Fossum & Fredrich (2007) e Santos & Ramos Jr. (2012).

6.3. Especificações do modelo sintético

Considerando o modelo de seção transversal apresentado por Fossum & Fredrich (2007) representativo do pré-sal brasileiro, foi realizada uma retro-análise com propriedades tipicamente adotadas nas rochas salinas brasileiras para inferir a cota correspondente ao estado de tensão e temperatura apresentado por esses autores. As propriedades empregadas foram apresentadas na Tabela 5.5.

O objetivo é manter a mesma geometria (poço, revestimento e comprimento de borda) e as mesmas condições de temperatura e tensão, mas adotar as propriedades elásticas e de fluência da halita brasileira.

Tendo como base a tensão inicial de 84 MPa, a Tabela 6.1 apresenta uma composição de cotas que resultam aproximadamente nesse valor.

Tabela 6.1 – Estimativa de composição do carregamento geostático do modelo sintético do pré-sal brasileiro.

Material	Espessura (m)	Peso Específico (kN/m ³)	Sobrecarga (MPa)
LDA	2000	10,00	20,00
Pós Sal	2000	22,56	45,12
Sal	1000	21,29	21,29
Tensão geostática inicial (MPa)			86,41

A temperatura apresentada pelos autores foi de 344,1 K (≈ 71 °C). Adotando-se os gradientes geotérmicos típicos, têm-se na Tabela 6.2:

Tabela 6.2 – Distribuição da temperatura no modelo sintético do pré-sal brasileiro a partir das cotas inferidas.

Material	Espessura (m)	Gradiente Geotérmico (°C/km)	Temperatura (°C)
LDA	2000	-	4
Pós Sal	2000	30,0	64
Sal	1000	12,0	76
Temperatura na seção (K)			349,15

Por fim, sabe-se que a pressão imposta pelo fluido de perfuração a parede do poço é de 64 MPa. Haja vista as cotas estimadas, essa pressão será atingida com o emprego de um fluido com peso específico de 11 lb/gal ($\approx 12,925$ kN/m³).

Portanto, assume-se que a seção transversal corresponde à cota (-) 5000 m. Ressalta-se que os valores da lâmina d'água e da espessura de sedimentos adotados já foram citados ou adotados por outros autores, como Botelho (2008) e Gonçalves (2011).

Apresenta-se na Figura 6.2 as cotas correspondentes ao estado de tensão e temperatura do modelo sintético apresentado por Fossum & Fredrich (*op. cit.*), cuja geometria e dimensões são adotadas nesta análise.

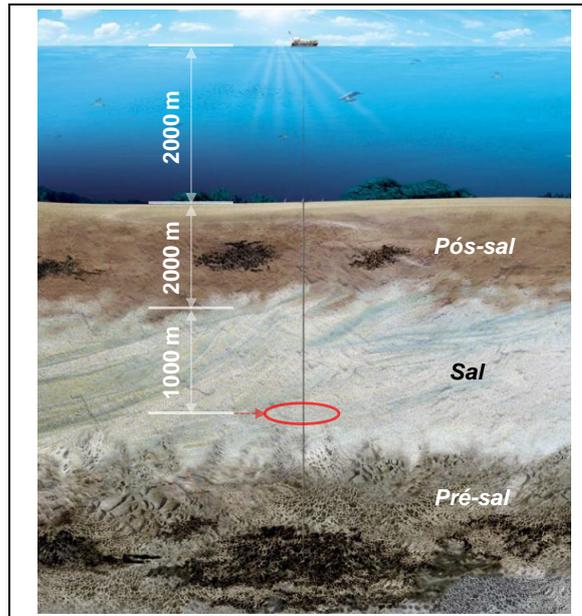


Figura 6.2 – Esquema da litologia do modelo representativo do pré-sal (adaptado de Christante, 2009).

Com relação à geometria, o diâmetro nominal do poço é de 18 ¼ polegadas ($\approx 23,2$ cm), elipsoidal, com 5% de deformação diametral (ovalização). Esse percentual é distribuído de modo que o diâmetro vertical é 0,6% maior do que o nominal e o horizontal é 4,4% menor do que o mesmo. Foi adotado um revestimento metálico com diâmetro nominal de 13 5/8 polegadas ($\approx 17,3$ cm) e 0,625 polegadas ($\approx 1,6$ cm) de espessura. A Figura 6.3 mostra em detalhe a seção transversal com a deformação diametral assumida no modelo.

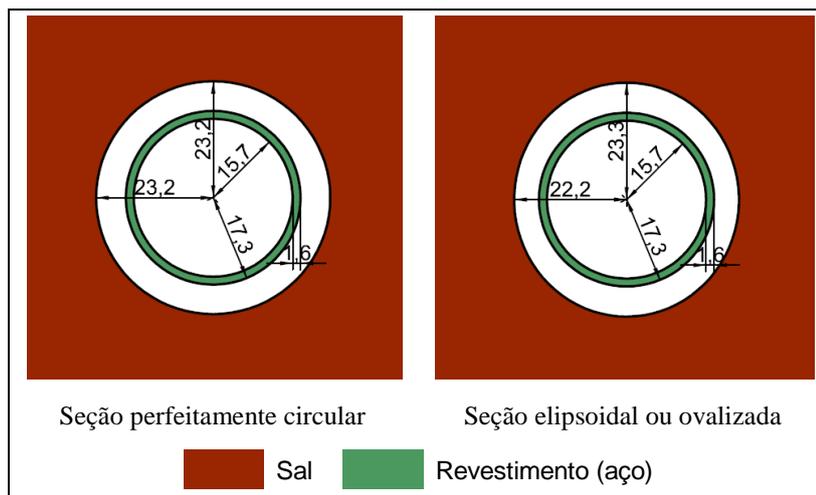


Figura 6.3 – Detalhe para o poço de 18 ¼: seção perfeitamente circular e seção elipsoidal ou ovalizada em 5% (adotada) – medidas em cm.

Foi adotado um modelo com borda circular, conforme mostra a Figura 6.4. O diâmetro do modelo tem 40 metros (cerca de 85 vezes o diâmetro maior do poço), evitando-se efeitos de borda.

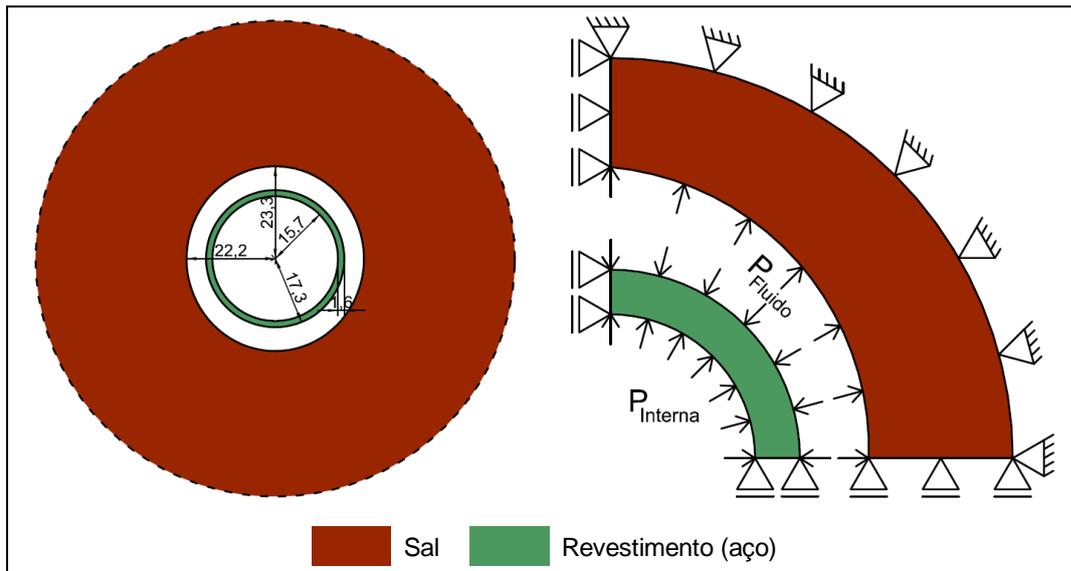


Figura 6.4 – Modelo geomecânico de poço com borda circular (medidas em cm, exceto onde indicado).

A malha de elementos finitos tem 8464 nós 2745 elementos CPE8R, com integração reduzida (2 x 2), considerando um estado “pseudo-plano” de deformações (Figura 6.5).

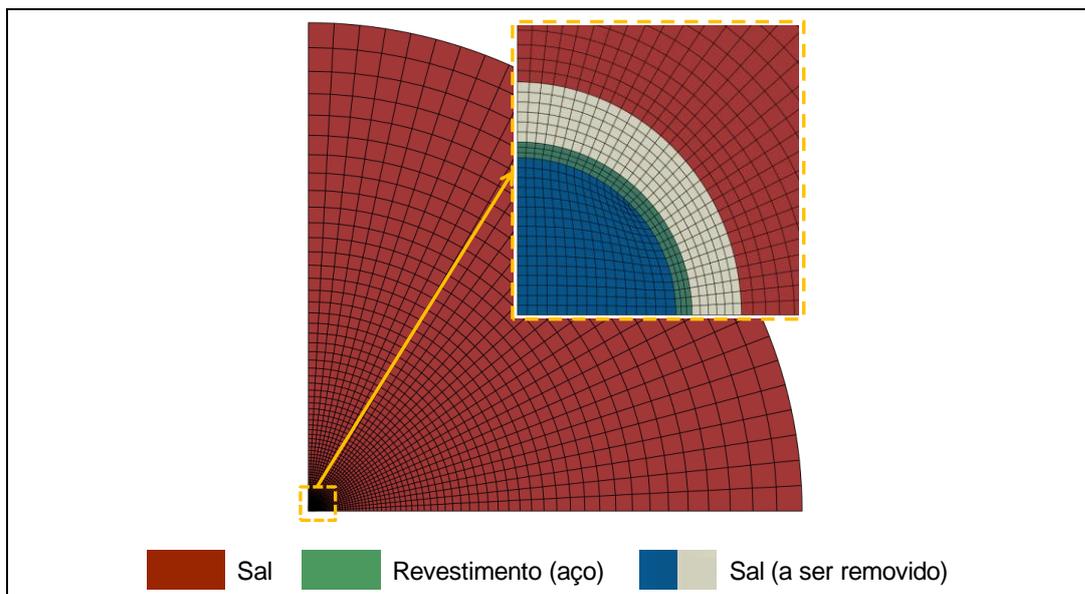


Figura 6.5 – Modelo geomecânico – malha .

A estruturação da malha na região do sal foi feita conforme apresentado no item 4.3. No revestimento, adotou-se a mesma discretização de Fossum & Fredrich (*op. cit.*), que consiste em 30 elementos na direção radial e 3 elementos ao longo da espessura do revestimento.

As propriedades elásticas e de fluência adotadas para a halita brasileira foram apresentadas no capítulo 03.

O aço é considerado elástico perfeitamente plástico, com as propriedades apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Propriedades do aço (Fossum & Fredrich, *op. cit.*).

	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)
Aço	210,0	0,30	438,0

onde E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson e σ_y é a tensão de escoamento.

As condições iniciais foram aplicadas ao modelo geomecânico pelo modo simplificado, conforme o item 4.2.2.7.3.

Na análise, será simulada a condição de falha de cimentação de 100% ou 360°. O efeito de compressibilidade do fluido de perfuração reagindo contra a parede do poço não foi considerado, tendo em vista que a pressão por ele exercida é representada por uma pressão na superfície e não por elementos de fluido. Assume-se também que a pressão interna do revestimento tem o mesmo valor que a externa (64 MPa) e que essa condição é mantida durante a simulação.

A vida útil pretendida para o poço é 30 anos, sendo esse, portanto, o tempo de simulação.

6.4. Variáveis aleatórias

Diante da complexidade do problema, diversos parâmetros, embora assumidos com um determinado valor, apresentam incertezas de magnitude relevante, que podem provocar grande variabilidade de resultados.

São apresentadas a seguir as variáveis aleatórias consideradas nas análises probabilísticas para obtenção das superfícies de resposta, entendendo-se que essas representam parâmetros estratégicos para as análises de fluência. Não foram consideradas variáveis aleatórias que implicassem em mudança na geometria inicial do modelo.

Com relação às funções de densidade de probabilidade, ou seja, aos modelos matemáticos para descrição das variáveis aleatórias, foram adotadas as distribuições normal e lognormal, conforme usual em geotecnia (Hoek, 2000). Como a disponibilidade de dados experimentais publicados da halita brasileira é limitada, para geração das distribuições dos parâmetros de elásticos e de fluência,

foram adotados os coeficientes de variação apresentados por Fossum *et al.* (1991) e Fossum & Fredrich (*op. cit.*). Os valores apresentados no capítulo 3 e validados no capítulo 5 são adotados como média.

A Tabela 6.4 mostra as propriedades elásticas, térmicas e relacionadas ao estado de tensão do problema. Essas são consideradas como variáveis aleatórias tanto nas análises com o Modelo de Duplo Mecanismo quanto com o Modelo de Multi Mecanismo.

Tabela 6.4 – Relação das variáveis aleatórias (1/3): propriedades elásticas, térmicas e de estado de tensão.

Propriedades elásticas, térmicas e de estado de tensão			
Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Distribuição
E (GPa) *	25.37	2.537	Normal
ν *	0.36	0.036	Normal
T (K) **	344.1	8.89	Normal
$\sigma_{inicial}$ (MPa) **	84	4.2	Normal
P_{fluido} (MPa) **	64	3.45	Normal
* A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum <i>et al.</i> (1991); ** A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum & Fredrich (2007).			

Os parâmetros elásticos, a saber: o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν), regulam o nível inicial de deformações após a perfuração do poço em ambos os modelos constitutivos. No Modelo de Multi Mecanismo, eles também influenciam a curva de fluência, uma vez que o módulo de cisalhamento (função dos dois parâmetros) normaliza o estado de tensões nas equações constitutivas.

A temperatura (T) é um importante parâmetro também para ambos os modelos. Embora esta pesquisa não se dedique a resolver o problema térmico associado à fluência, a temperatura como valor fixado influencia-a diretamente.

Por último, embora com importância primordial, são citadas a tensão inicial (geostático, $\sigma_{inicial}$) e a pressão do fluido de perfuração (P_{fluido}). Conforme mostrado anteriormente, o desequilíbrio de tensões provocado pela perfuração do poço é atenuado pela pressão do fluido de perfuração, de modo que o diferencial causado pela tensão inicial e a pressão do fluido resulta no estado de tensões

desviadoras que ativará o fenômeno da fluência. Os fenômenos estudados são extremamente sensíveis a esses dois parâmetros.

Trabalhando-se com gradientes geotérmicos, litostáticos e a densidade do fluido de perfuração, as três variáveis tornam-se função da cota analisada. Entretanto, neste capítulo, apesar da inferência da cota, serão tratados como três parâmetros não correlacionados.

A Figura 6.6 apresenta as densidades de probabilidade com distribuições normais do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do sal.

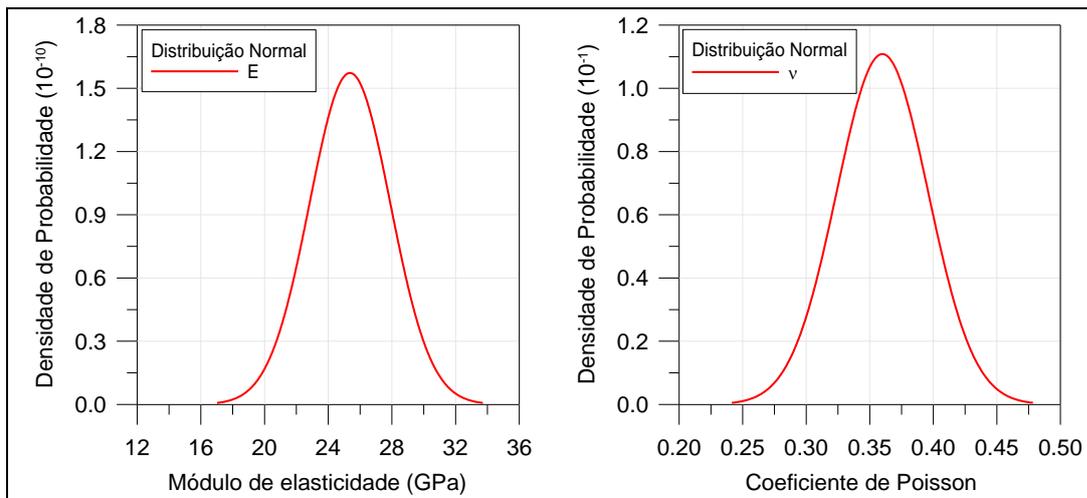


Figura 6.6 – Distribuições dos parâmetros elásticos.

A Figura 6.7 mostra as densidades de probabilidade das variáveis aleatórias relacionadas ao estado de tensão.

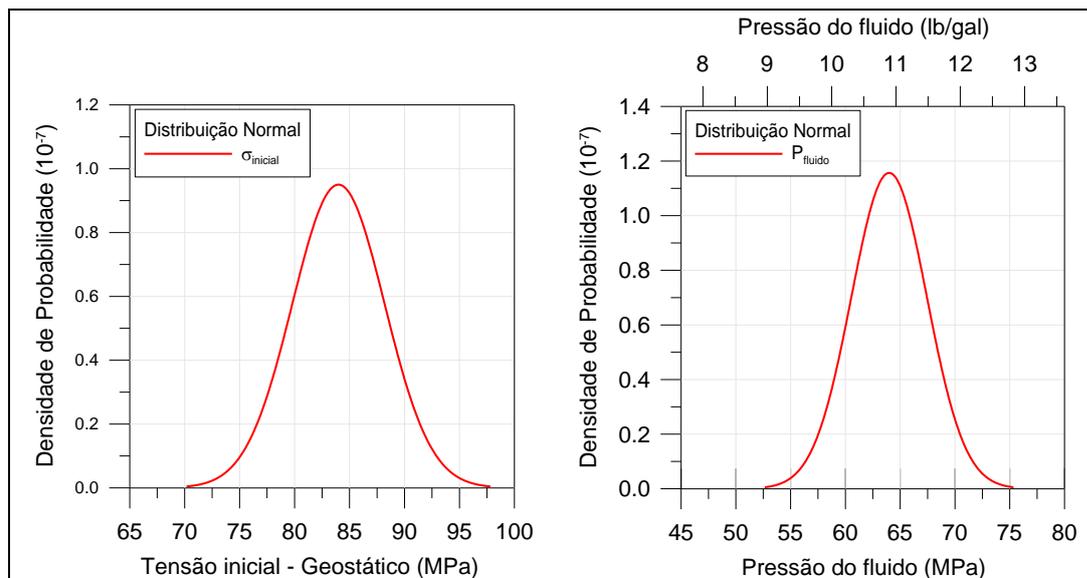


Figura 6.7 – Distribuições do carregamento geostático e pressão do fluido de perfuração.

Com relação à tensão inicial, o intervalo de 70 a 98 MPa permite avaliar uma eventual superestimativa do gradiente litostático para valores inferiores a 84

MPa e coeficientes de empuxo de até 1,16 para valores superiores. O intervalo de 53 a 75 MPa na pressão do fluido de perfuração permite avaliar o efeito da gradual redução do peso específico ao longo da vida produtiva do poço. Em termos quantitativos, são avaliados pesos de 9,0 lb/gal a 13,0 lb/gal.

A seguir, são listadas as variáveis aleatórias relacionadas à fluência. A Tabela 6.5 apresenta a variável aleatória específica do Modelo de Duplo Mecanismo, que é a taxa de deformação limite entre os mecanismos de discordâncias e a solubilização por pressão ($\dot{\epsilon}_0$). Alternativamente, poderia ser a taxa de deformação de Prandtl.

Tabela 6.5– Relação das variáveis aleatórias (2/3): propriedades de fluência do Modelo de Duplo Mecanismo.

Propriedades de fluência do Modelo de Duplo Mecanismo			
Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Distribuição
$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹) *	5.244 (10 ⁻¹⁰)	5.611 (10 ⁻¹⁰)	Lognormal
* A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum & Fredrich (2007), por analogia com o parâmetro A_2 do Modelo de Multi Mecanismo.			

Deduz-se a importância dessa variável uma vez que a taxa de deformação será corrigida para quaisquer temperaturas e energias de ativação, de modo que a resposta do modelo sempre será uma correlação feita com esse valor. Experimentalmente, a calibração desse parâmetro é feita a partir da observação da evolução da taxa de deformação (conforme mostrado nos capítulos 02 e 03) e do ajuste de retas. A própria metodologia introduz incertezas sobre esse valor. Os parâmetros estatísticos da distribuição desse parâmetro foram inferidos a partir do coeficiente de variação do parâmetro A_2 do Modelo de Multi Mecanismo (Fossum & Fredrich, 2007), entendendo-se que ambos os parâmetros atuam como coeficientes de uma equação potencial de fluência.

A Figura 6.8 mostra as distribuições da temperatura e da taxa de deformação limite. Na temperatura, é avaliado o intervalo de 315 K (42 °C) a 373 K (100 °C). Fisicamente, a incerteza quanto a temperatura é devida as incertezas quanto aos gradientes geotérmicos das rochas subjacentes e do sal. Na taxa de deformação, a mobilidade do sal é avaliada.

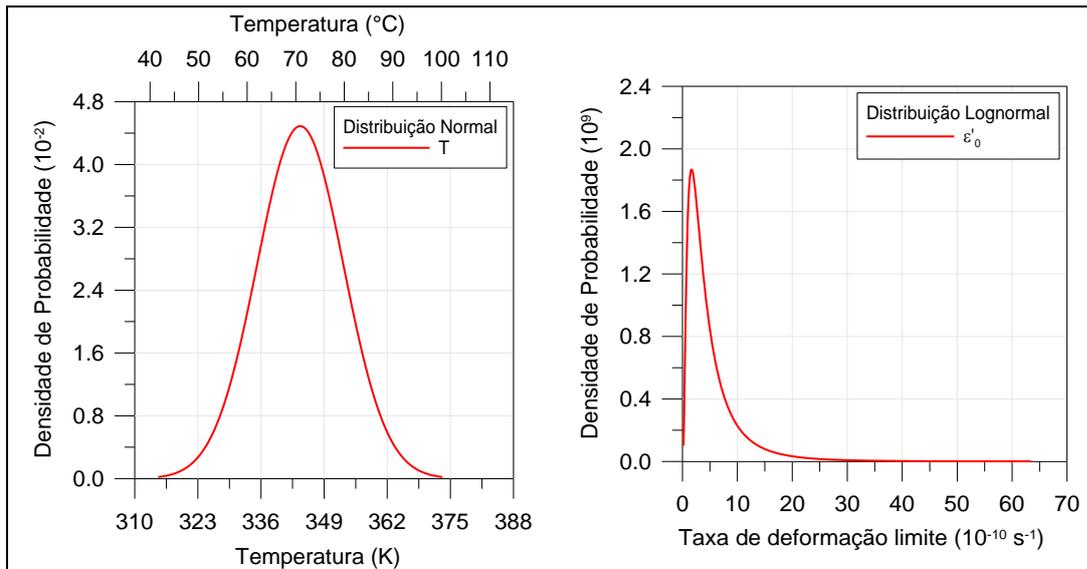


Figura 6.8 – Distribuições da temperatura e da taxa de deformação limite.

Por fim, a Tabela 6.6 apresenta as quatro variáveis do Modelo de Multi Mecanismo usualmente consideradas como aleatórias. Foram aplicados os coeficientes de variação apresentados por Fossum & Fredrich (2007) nos parâmetros determinados para a halita brasileira, no capítulo 03.

Tabela 6.6 – Relação das variáveis aleatórias (3/3): propriedades de fluência do Modelo de Multi Mecanismo.

Propriedades de fluência do Modelo de Multi Mecanismo			
Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Distribuição
K_0 *	$7.750 (10^4)$	$4.685 (10^4)$	Lognormal
$A_2 (s^{-1})$ *	$1.924 (10^6)$	$2.059 (10^6)$	Lognormal
α_h *	-17.37	-9.27	Normal
β_h *	-7.738	-2.158	Normal

* A partir do coeficiente de variação adotado por Fossum & Fredrich (2007).

Conforme explicado no capítulo 03, o fator limitante de fluência primária (K_0) e os parâmetros de endurecimento (α_h e β_h) influenciam a curvatura do trecho primário da curva de fluência. Já o fator estrutural do mecanismo indefinido (A_2) tem um papel importante da fluência secundária. Uma vez que, à longo prazo, a fluência secundária predomina, é esperado que esse parâmetro seja o mais importante (em relação aos demais do Modelo de Multi Mecanismo) nas análises de fluência. A Figura 6.9 mostra as densidades de probabilidade das variáveis aleatórias listadas acima.

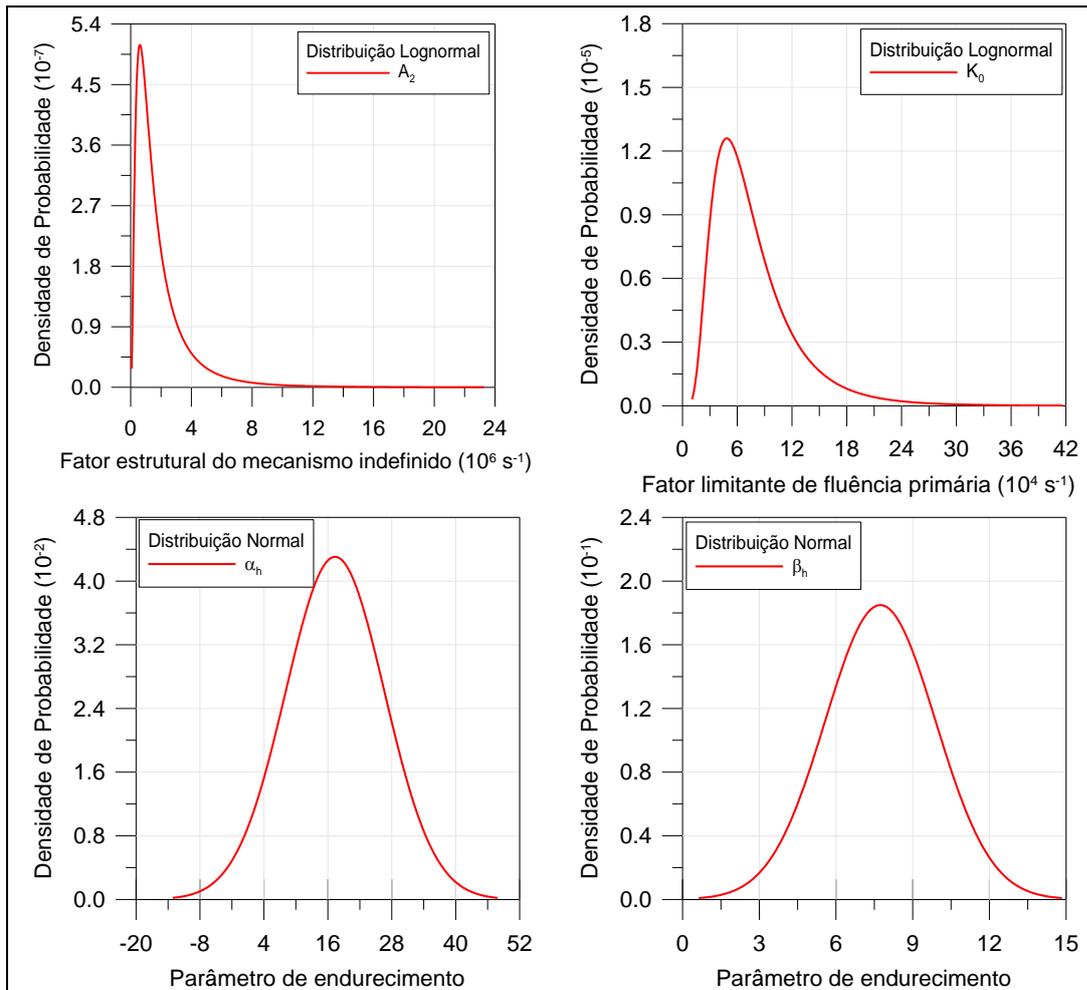


Figura 6.9 – Distribuições das variáveis aleatórias do Modelo de Multi Mecanismo.

6.5. Metodologia

A metodologia empregada para as análises probabilísticas utiliza dois programas comerciais – ABAQUS® e NESSUS®, além de três rotinas auxiliares para tratamento de arquivos de saída.

A primeira análise a ser rodada é a determinística, na qual todas as variáveis aleatórias são prescritas com o valor da média de suas respectivas distribuições, que são os valores determinísticos. A seguir, as variáveis aleatórias e suas distribuições são inseridas no NESSUS® e os arquivos de entrada são importados nele. O programa irá manipular esses arquivos nos campos das variáveis aleatórias, produzindo novos arquivos de entrada (com as variáveis alteradas) a serem rodadas. Os novos resultados são computados para a geração da superfície de resposta do fenômeno estudado.

O critério de manipulação dos arquivos varia com o método de análise probabilística empregado. Nesta pesquisa, foram adotados os métodos de Valor Médio (*Mean Value Methods*): Valor Médio (*MV*), Valor Médio Avançado (*AMV*) e Valor Médio Avançado com Iterações (*AMV+*). As respectivas metodologias são apresentadas no Apêndice C. Esses métodos já foram empregados com sucesso em análises de fluência em rochas salinas por Fossum & Munson (1996) e Fossum & Fredrich (2007).

Os alvos da análise probabilística são o fechamento do sal, mais especificamente o tempo em que o sal leva para entrar em contato com o revestimento, e a plastificação do revestimento, ou seja, o tempo em que é verificada a primeira região plastificada no aço. As metodologias são cíclicas e análogas, conforme será mostrado a seguir.

A metodologia para análises de fechamento do sal é apresentada na Figura 6.10.

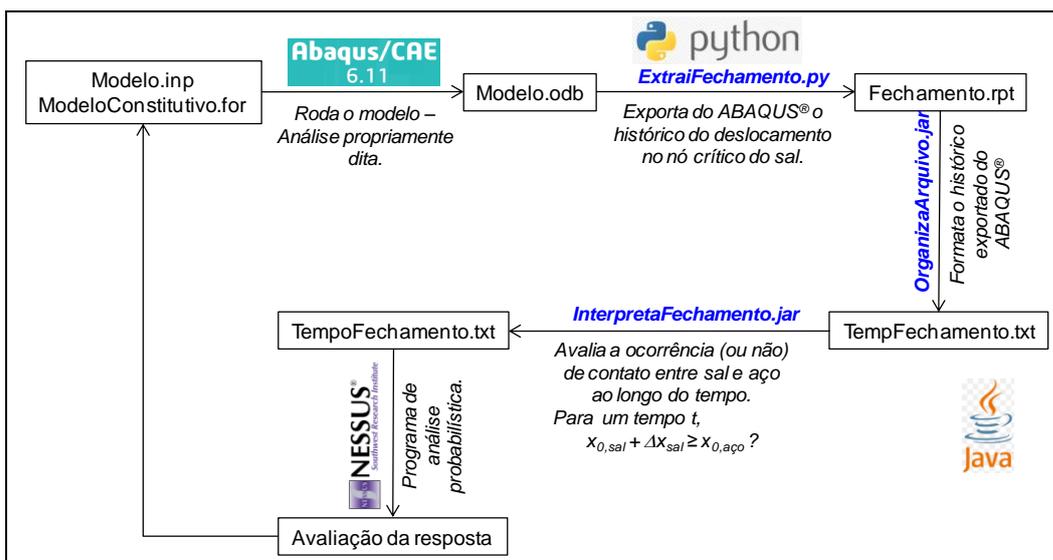


Figura 6.10 – Metodologia para análise probabilística de fechamento do sal.

Para cada análise (ou grupo de análises), são gerados dois arquivos de entrada: o modelo geral (*.inp) e o modelo constitutivo (*.for). Esses arquivos são executados pelo ABAQUS®, gerando um modelo de pós-processamento (*.odb). Esse modelo é acessado por pela rotina “ExtraiFechamento.py” em linguagem PYTHON, que extrai o histórico de deslocamentos do nó do sal na direção do menor anular, que será o primeiro a entrar em contato com o revestimento. Esse histórico é padronizado nesta pesquisa com o nome “Fechamento.rpt”. Ele é formatado, deixando somente os campos indispensáveis pela rotina

“OrganizaArquivo.jar” em linguagem JAVA e interpretado pela rotina “InterpretaFechamento.jar”, na mesma linguagem. A interpretação avalia a cada instante a coordenada atual do nó do sal comparando-a com a do aço. Uma vez que os valores se igualem, tem-se o tempo do primeiro contato entre sal e aço ($t_{c,i}$), que é registrado no arquivo de resposta “TempoFechamento.txt”. Esse arquivo é lido pelo NESSUS[®], e processado conforme a metodologia probabilística adotada.

A Figura 6.11 apresenta a metodologia para as análises de plastificação do revestimento, análoga a de fechamento.

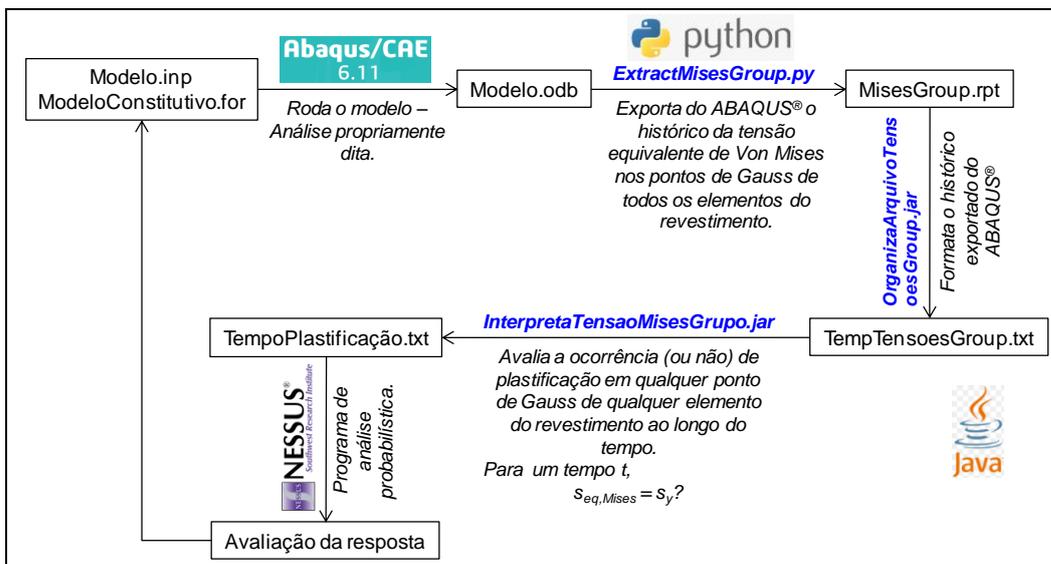


Figura 6.11 – Metodologia para análise probabilística de plastificação do revestimento.

Para cada análise ou grupo de análises, são gerados dois arquivos de entrada e rodados pelo ABAQUS[®], gerando um modelo de pós-processamento, analogamente a metodologia anteriormente descrita. O modelo de pós-processamento é acessado por pela rotina “ExtractMisesGroup.py”, que extrai o histórico de tensões equivalentes de von Mises em todos os pontos de integração de todos os elementos do revestimento. Esse histórico é padronizado nesta pesquisa com o nome “MisesGroup.rpt”. Ele é formatado, deixando somente os campos indispensáveis pela rotina “OrganizaArquivoTensoesGroup.jar” e interpretado pela rotina “InterpretaTensaoMisesGrupo.jar”. A interpretação avalia a cada instante a tensão de von Mises do ponto de integração, normalizando-a pela tensão de escoamento do aço. No instante que for verificada a primeira razão unitária entre tensões, tem-se o tempo da primeira plastificação do aço ($t_{y,i}$), que é

registrado no arquivo de resposta “TempoPlastificacao.txt”. Esse arquivo é lido pelo NESSUS[®], e processado conforme a metodologia probabilística adotada.

6.6. Análise determinística

Neste item, são apresentados os resultados das análises determinísticas de fechamento do sal e plastificação do revestimento. A metodologia adotada para esse tipo de análise e as aferições do contato sal-aço e do funcionamento das sub-rotinas dos modelos constitutivos foram descritas no capítulo 04.

A Figura 6.12 mostra a imposição do estado inicial tensões (isotrópico).

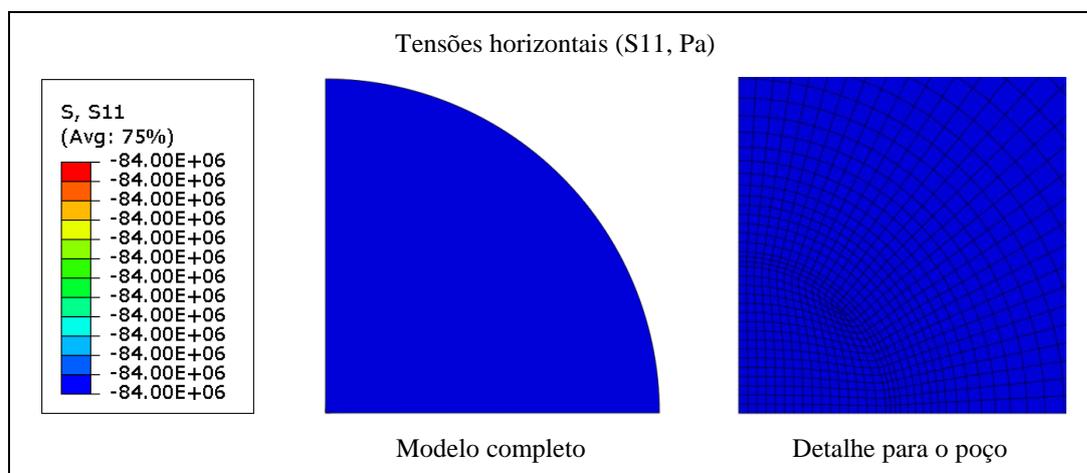


Figura 6.12 – Modelo geomecânico com condições iniciais impostas: estado inicial de tensões.

A Figura 6.13 mostra os deslocamentos iniciais do modelo, funcionalmente nulos.

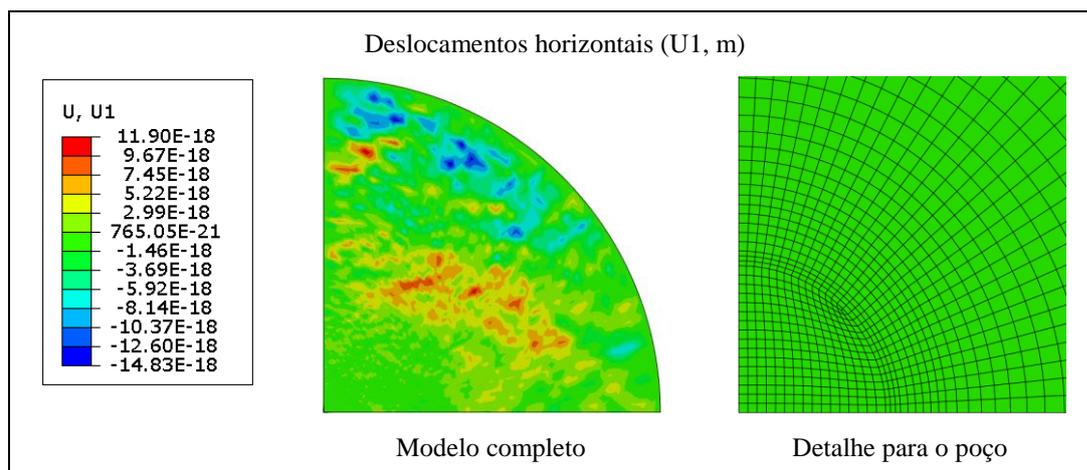


Figura 6.13 – Detalhe para o entorno do poço – condições iniciais: deslocamentos iniciais.

A seguir, o poço foi perfurado e ocorre a reação elástica, com deslocamentos não nulos, conforme mostra a Figura 6.14. Considerando que o

poço permaneça não revestido durante 30 dias, é apresentado também o fechamento horizontal após esse período.

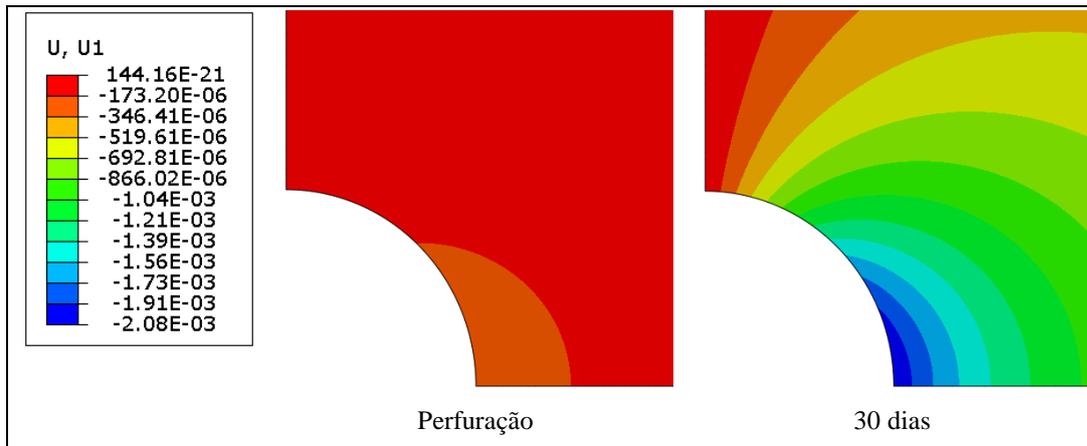


Figura 6.14 – Fechamento horizontal imediatamente após a perfuração e após 30 dias – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Levando-se em conta que o tempo total da análise é a vida útil projetada para o poço, 30 anos, bem como o fato de que o tempo não revestido não foi informado pelos autores com base nos quais esse modelo sintético foi adotado, optou-se por não considerar o período não revestido do poço, assumindo que a instalação do revestimento acontece logo após a perfuração.

A partir da Figura 6.14, verifica-se que o fechamento em 30 dias de fluência foi de aproximadamente 2 mm, podendo ser desconsiderado se comparado ao fechamento previsto ao longo de 30 anos. A título de comparação, o fechamento medido para o poço 6-RJS-457 (capítulo 05) com o mesmo modelo constitutivo foi de 1,21 mm em 10 horas, de modo que no presente modelo sintético, as taxas de fechamento foram muito inferiores.

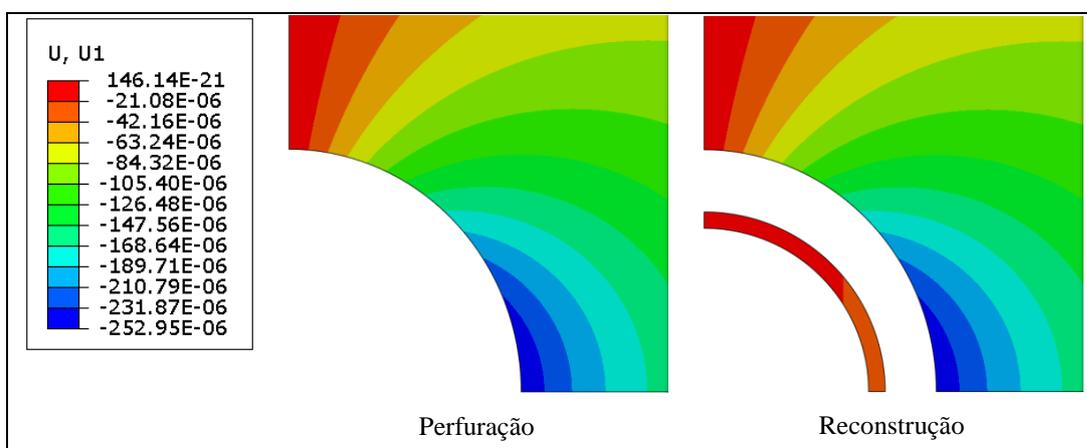


Figura 6.15 – Fechamento horizontal imediatamente após a perfuração e após a reconstrução – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

A Figura 6.15 mostra o fechamento horizontal imediatamente depois da perfuração (idem a Figura 6.14, mas com outra escala de cores) e depois da reconstrução do revestimento.

Com o diferencial de tensões imposto, o sal inicia o alívio de energia de deformação por fluência. Antes do término da vida útil do poço, é esperado que o sal entre em contato com o revestimento e passe a impor um carregamento não uniforme, que pode fazer com o aço plastifique. Existem três momentos de interesse para esta análise. O primeiro é o tempo em que ocorre o primeiro contato entre sal e aço, que se dá na direção de menor anular, aqui denominado $t_{c,i}$. A seguir, eventualmente antes do envolvimento total, espera-se que zonas do aço entrem em regime plástico. O tempo em que o primeiro ponto de integração dos elementos do aço excede a tensão de escoamento é chamado $t_{y,i}$. Por fim, quando o sal envolve completamente o revestimento, ou seja, quando a direção de maior anular se fecha, tem-se o $t_{c,f}$. É esperado que a não uniformidade no carregamento seja mais pronunciada enquanto o revestimento está parcialmente envolvido pelo sal, no intervalo entre $t_{c,i}$ e $t_{c,f}$.

A Figura 6.16 e a Figura 6.17 mostram a discretização temporal das análises determinísticas para cada modelo constitutivo adotado. Uma vez que esse procedimento é dinâmico, cabendo ao usuário limitar os incrementos mínimo e máximo admissíveis bem como a tolerância²⁸, cada análise teve uma discretização temporal desenvolvida conforme sua convergência. Os incrementos de tempo máximos foram de 3,50 dias para o Modelo de Duplo Mecanismo e 2,08 dias para o Modelo de Multi Mecanismo. Nesse último, por maior sensibilidade na convergência, o incremento máximo de tempo teve de ser inferior e gradualmente distribuído ao longo do tempo de simulação.

Em ambos os casos, é verificado um trecho ruidoso no período compreendido entre o primeiro contato do sal com o revestimento e o envolvimento completo desse por aquele. Esse trecho é devido a difícil convergência durante o contato gradual entre as superfícies do sal e do aço. Uma vez que todo o revestimento tenha sido envolvido pelo sal, a incrementação

²⁸ A tolerância de convergência controla o incremento de tempo máximo efetivamente utilizado, sendo definida de acordo nível de tensões do problema ou com a máxima taxa de deformação admissível.

temporal tende a retornar a condição constante e assume o valor máximo definido pelo usuário.

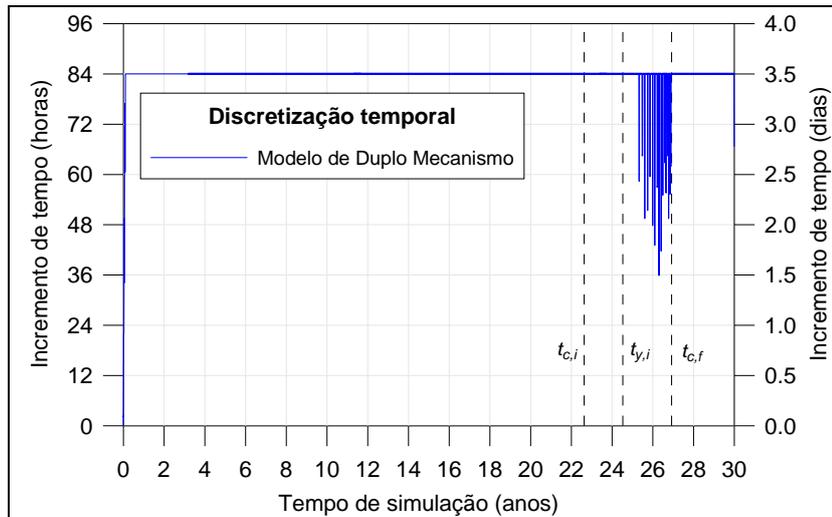


Figura 6.16 – Discretização temporal – Análise determinística pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

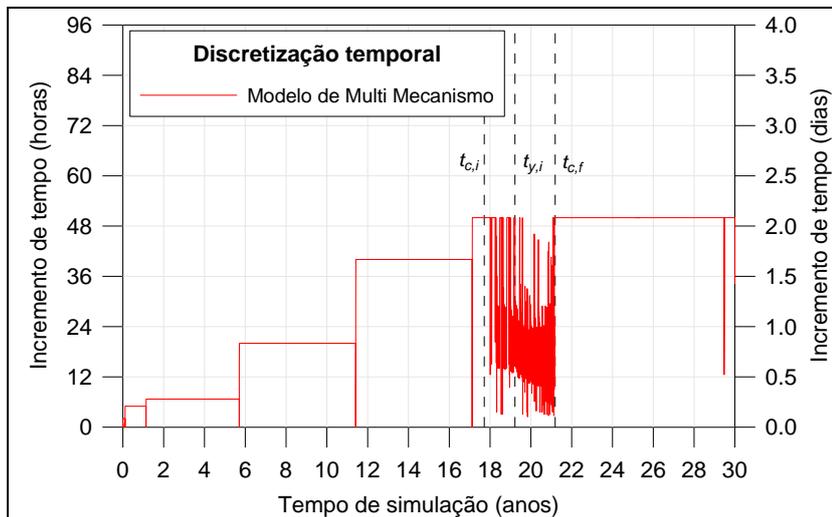


Figura 6.17 – Discretização temporal – Análise determinística pelo Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Conforme já mencionado, o contato do sal com o aço durante a vida útil do poço é um evento indesejável, embora, em si próprio não seja proibitivo. Por outro lado, sob critérios rigorosos, a plastificação do revestimento durante o mesmo período torna-se proibitiva – ou seja, esse evento pode ser considerado um critério de falha.

A Figura 6.18 mostra a evolução do diferencial de tensões em escala de cores apropriada para a faixa de tensões do sal, imediatamente após a perfuração, após o primeiro contato com o revestimento ($t_{c,i}$) e após 30 anos de simulação.

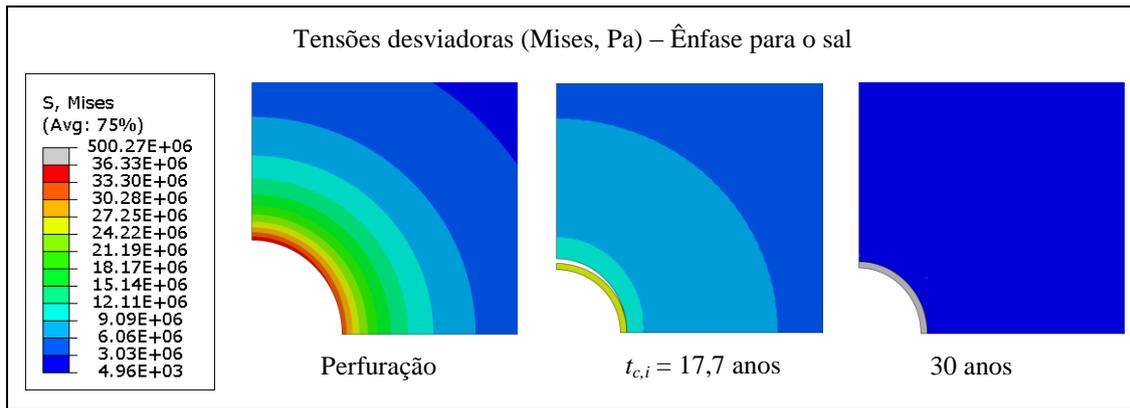


Figura 6.18 – Evolução das tensões desviadoras ao redor do poço com ênfase para o sal – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

A Figura 6.19 apresenta a evolução das tensões desviadoras em escala de cores apropriada para a faixa de tensões do aço. Os contornos da tensão de von Mises nos períodos indicados conduzem a importantes conclusões sobre o efeito da não circularidade do furo no tubo metálico. Observa-se que a partir do primeiro contato entre o sal e o aço, um carregamento não uniforme é imposto ao revestimento. Com isso, decorrido algum tempo, são notadas as primeiras regiões plastificadas. Após o envolvimento total do revestimento pelo sal, a plastificação próxima a direção de maior anular é gradualmente atenuada, uma vez que o carregamento imposto ao revestimento tende novamente a uniformidade.

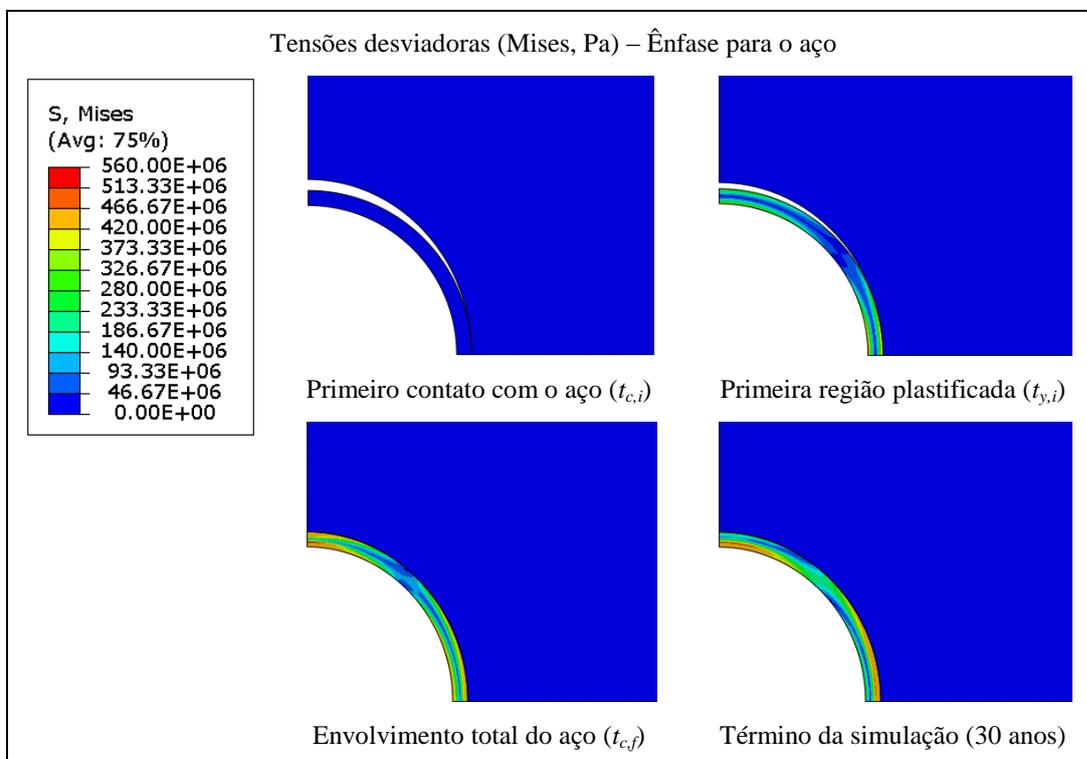


Figura 6.19 – Evolução das tensões desviadoras ao redor do poço com ênfase para o aço – Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A).

Inicialmente, são apresentados os resultados de fechamento do sal e do aço obtidos com o Modelo de Multi Mecanismo. A Figura 6.20 mostra a evolução do fechamento na direção A-A', de menor anular. Nessa direção ocorrerá o primeiro contato entre o sal e o revestimento (aço). Pela fluência, o sal se deforma e entra em contato com o aço. A seguir, ambos deformam juntos, visto que a deformação do aço ocorre em decorrência da deformação do sal, até seja alcançado o limite elástico do aço. Uma vez que o aço é considerado perfeitamente plástico, configuração deformada torna-se constante até o final da simulação.

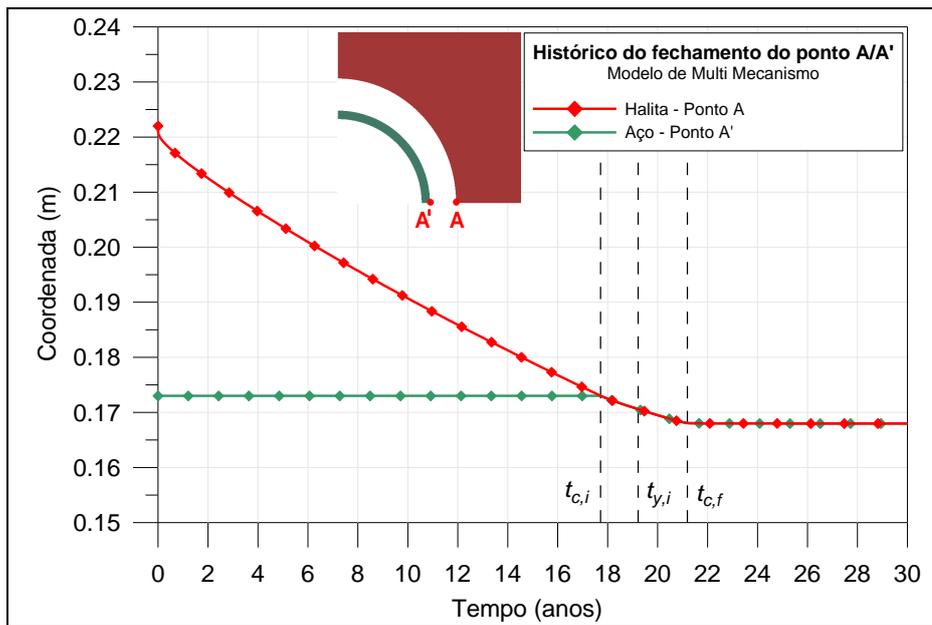


Figura 6.20 – Evolução do fechamento do sal e do revestimento pelo Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A) na direção A/A', de menor anular.

A Figura 6.21 apresenta a evolução do fechamento na direção B, de maior anular, a qual será último ponto de contato entre sal e aço, antes do envolvimento total do revestimento pela rocha. Quando ocorre o primeiro contato, na direção A-A', o tubo tende a se deformar ao longo da direção B-B' aumentando seu diâmetro (torna-se elipsoidal, assim como a seção do furo). Simultaneamente, o sal se deforma nessa mesma direção e em sentido oposto, de modo que os deslocamentos do sal e do aço em B/B' tendem a aproximá-los. Uma vez que entram em contato, semelhantemente, deformam-se juntos até seja alcançado o limite elástico do aço e a configuração deformada permanece constante até o final da simulação.

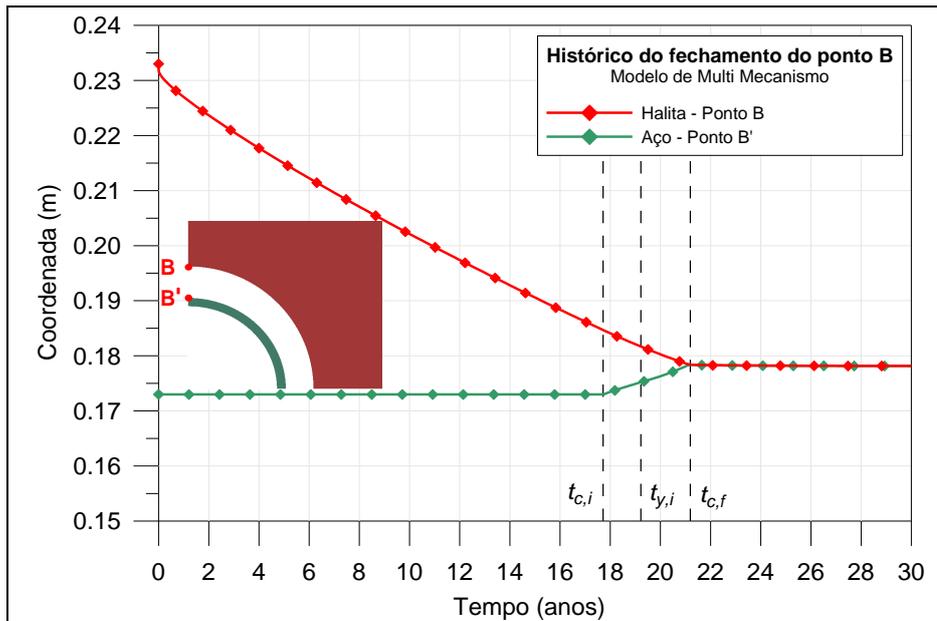


Figura 6.21 – Evolução do fechamento do sal e do revestimento pelo Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A) na direção B/B', de maior anular.

É necessário também avaliar a evolução da razão de plastificação. Quando essa razão atinge valor unitário, considera-se que o material entrou em regime plástico na região avaliada. Inicialmente é apresentada na Figura 6.22 a evolução com o tempo da tensão equivalente de von Mises do aço nos dois elementos²⁹ extremos na direção A/A', de menor anular, ficando demonstrada a premissa de que o fenômeno da plastificação decorre diretamente da fluência.

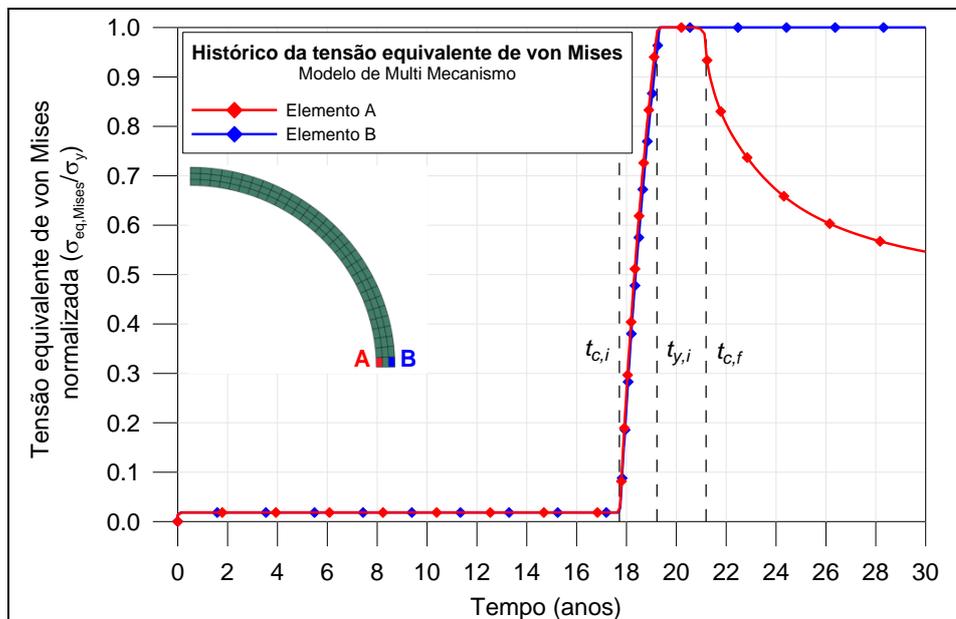


Figura 6.22 – Evolução da plastificação do revestimento pelo Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A) na direção A/A', de menor anular.

²⁹ Usa-se o termo elemento, referindo-se especificamente aos pontos de integração.

Ao longo da análise, até que ocorra o contato, não são detectadas tensões desviadoras de magnitude relevante – uma pequena razão de plastificação anterior ao contato é devida ao sutil desequilíbrio entre as pressões interna e externa do revestimento. Após o primeiro contato com sal, as tensões desviadoras (equivalente de von Mises) aumentam consideravelmente e o revestimento sofre plastificação nos dois elementos extremos, A e B.

A Figura 6.23 apresenta a evolução da plastificação na direção B/B'.

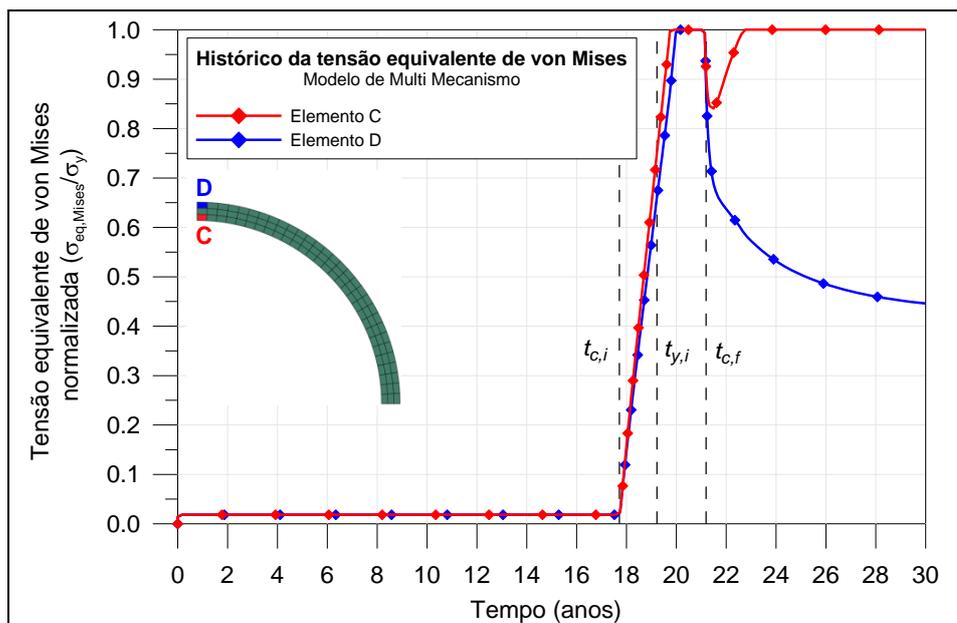


Figura 6.23 – Evolução da plastificação do revestimento pelo Modelo de Multi Mecanismo (MMM-A) na direção B/B', de maior anular.

Após o primeiro contato na direção de menor anular, ambos os extremos são influenciados e as tensões de von Mises aumentam, até que ambos plastifiquem.

Deve-se salientar que uma vez atingida a razão de plastificação unitária, considera-se que o material plastificou e esta condição é permanente, ainda que com o tempo a razão retorne a valores inferiores a 1, em virtude do alívio na tensão equivalente de von Mises decorrente do envolvimento completo do aço pelo sal.

Os resultados de fechamento do sal obtidos com o Modelo de Duplo Mecanismo são apresentados na Figura 6.24 e Figura 6.25. A justificativa física da evolução dos resultados é a mesma.

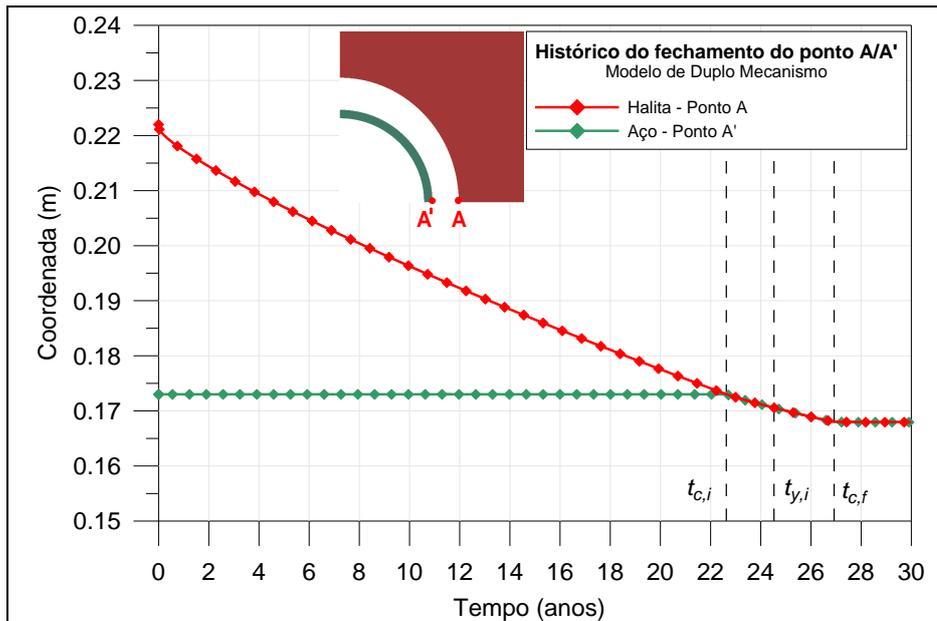


Figura 6.24 – Evolução do fechamento do sal e do revestimento pelo Modelo de Duplo Mecanismo na direção A/A', de menor anular.

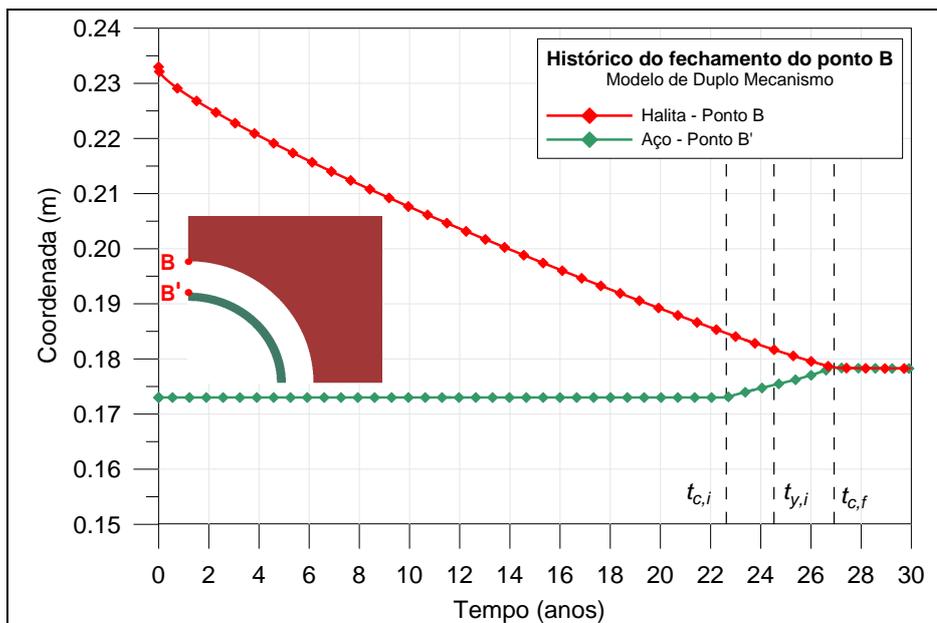


Figura 6.25 – Evolução do fechamento do sal e do revestimento pelo Modelo de Duplo Mecanismo na direção B/B', de maior anular.

A Figura 6.26 e a Figura 6.27 apresentam a evolução da plastificação no aço obtida pelo Modelo de Multi Mecanismo. As justificativas físicas para os resultados são as mesmas descritas anteriormente.

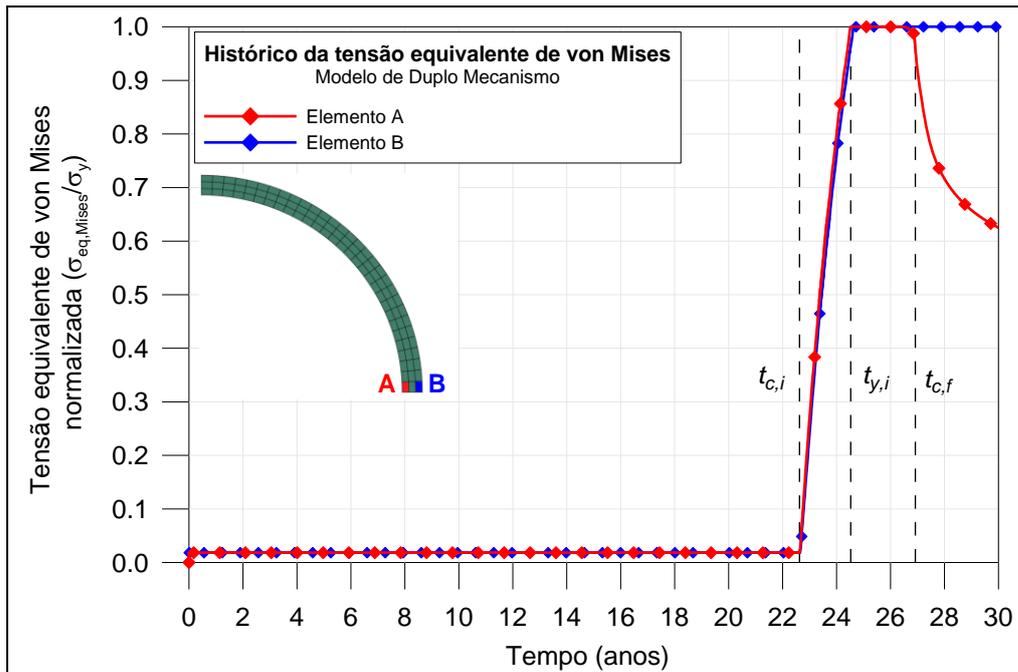


Figura 6.26 – Evolução da plastificação do revestimento pelo Modelo de Duplo Mecanismo na direção A/A', de menor anular.

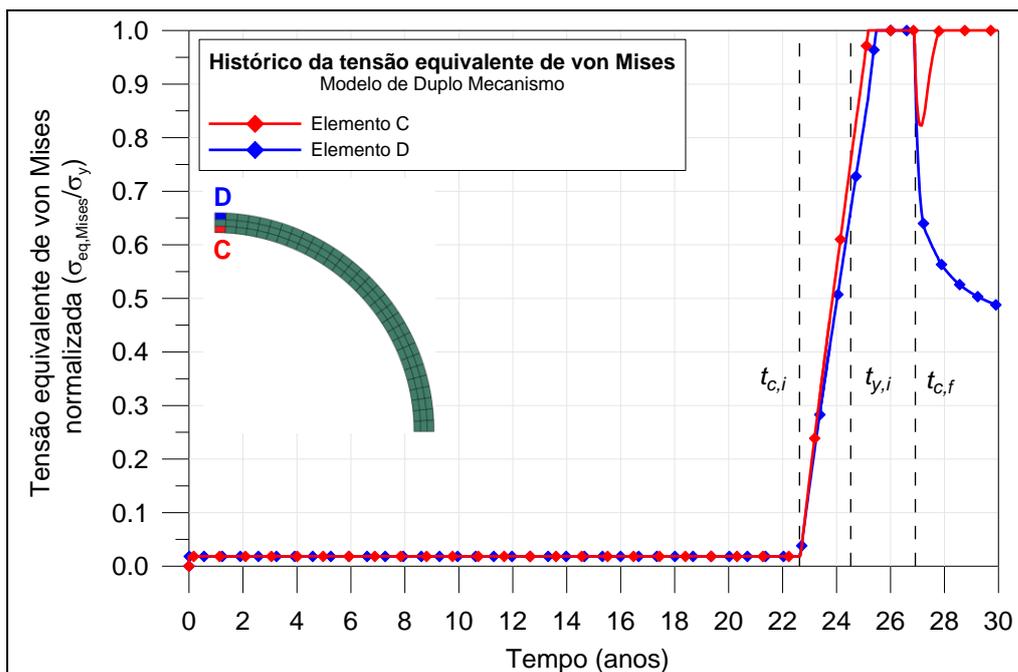


Figura 6.27 – Evolução da plastificação do revestimento pelo Modelo de Duplo Mecanismo na direção B/B', de maior anular.

A Tabela 6.7 resume os resultados determinísticos obtidos. À exemplo do que já vinha sendo observado, o Modelo de Multi Mecanismo conduz a fechamentos ligeiramente superiores aos obtidos pelo Modelo de Duplo Mecanismo, por considerar a contribuição da fluência primária e do mecanismo de deslizamento de discordâncias conforme a interpretação de seus autores.

Tabela 6.7 – Resultados determinísticos da análise de fechamento e de plastificação.

Resultados determinísticos			
Tempo (anos)	Descrição	MDM	MMM
$t_{c,i}$	Tempo em que ocorre o primeiro contato entre sal e aço	22,6	17,7
$t_{y,i}$	Tempo em que ocorre a plastificação do primeiro ponto de integração do aço	24,5	19,2
$t_{c,f}$	Tempo em que o sal envolve completamente o aço	26,9	21,2

onde MDM refere-se ao Modelo de Duplo Mecanismo e MMM refere-se ao Modelo de Multi Mecanismo.

Pode-se verificar que ambos os modelos conduziram a resultados inferiores aos esperados para o sal brasileiro, que, se comparado ao do Golfo do México, apresenta grande mobilidade. Entende-se que a magnitude dos resultados obtida podem estar relacionada ao uso da tensão equivalente de von Mises, ao invés de Tresca, conforme explicado no item 4.2.3.4.

6.7. Análise probabilística do fechamento do sal

Uma vez obtidas as soluções determinísticas para os eventos simulados empregando-se os dois modelos constitutivos, foram obtidas as superfícies de resposta para o tempo de primeiro contato do sal com o revestimento ($t_{c,i}$) na direção de menor anular, e para a primeira região plastificada no revestimento ($t_{y,i}$). A metodologia para tal foi descrita no item 6.5.

A vida útil do poço é de 30 anos, não prorrogável, de modo que as análises probabilísticas somente são pertinentes durante esse período. Entretanto, algumas das combinações de variáveis aleatórias resultaram em taxas de fechamento muito lentas, a partir das quais não foi verificado o primeiro contato ou a plastificação do aço em 30 anos – naturalmente esses eventos ocorreriam, mas já fora da vida útil do poço. Nesses casos, foram atribuídos tempos fictícios de 31 anos, em caráter de artifício para encerrar a curva de distribuição acumulada. Tais valores não têm significado físico ou probabilístico e somente são pertinentes como condicionantes para o ajuste da superfície de resposta.

Apresenta-se na Figura 6.28 a superfície de resposta para o tempo do primeiro contato entre o sal e o revestimento metálico ($t_{c,i}$), obtida pelo Modelo de

Multi Mecanismo. Esse contato durante a vida útil do poço é indesejável, mas não necessariamente proibitivo.

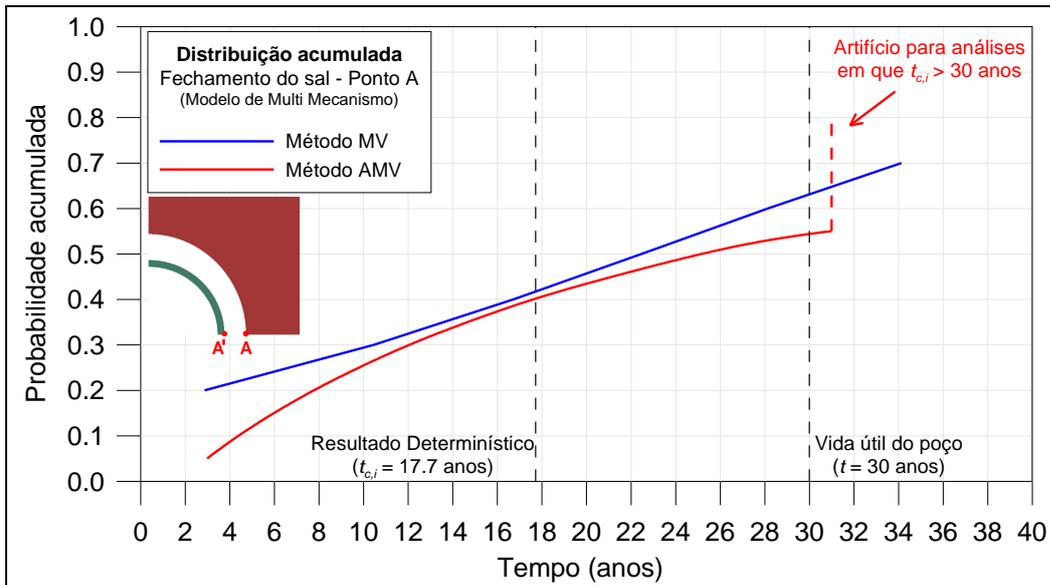


Figura 6.28 – Distribuição acumulada do fechamento do sal pelo Modelo de Multi Mecanismo.

Foram adotados os métodos do Valor Médio (*MV*) e Valor Médio Avançado (*AMV*). Não sendo uma condição proibitiva, não foi empregado o Método do Valor Médio Avançado com Iterações (*AMV+*). Os resultados mostram que o resultado determinístico ($t_{c,i}$) está associado a um nível de probabilidade de 40% (“P40”) para as incertezas atribuídas as variáveis aleatórias.

A Figura 6.29 mostra a evolução dos fatores de importância das variáveis aleatórias com os tempos de contato obtidos para o nível de probabilidade associado ao resultado determinístico (“P40”).

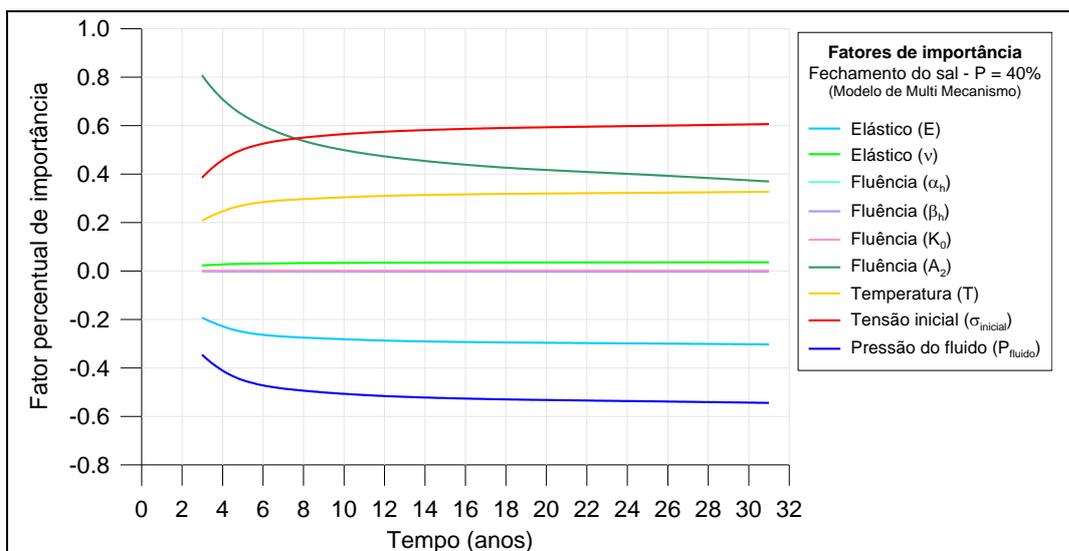


Figura 6.29 – Fatores de importância para “P40” - para análise de fechamento do sal pelo Modelo de Multi Mecanismo.

Observa-se que as variáveis de maior importância são os parâmetros associados ao estado de tensão (tensão inicial e pressão do fluido), temperatura e a taxa de deformação limite, do modelo constitutivo de fluência.

A Figura 6.30 é análoga, para o mesmo nível de probabilidade, mostrando a importância percentual das variáveis aleatórias na resposta obtida.

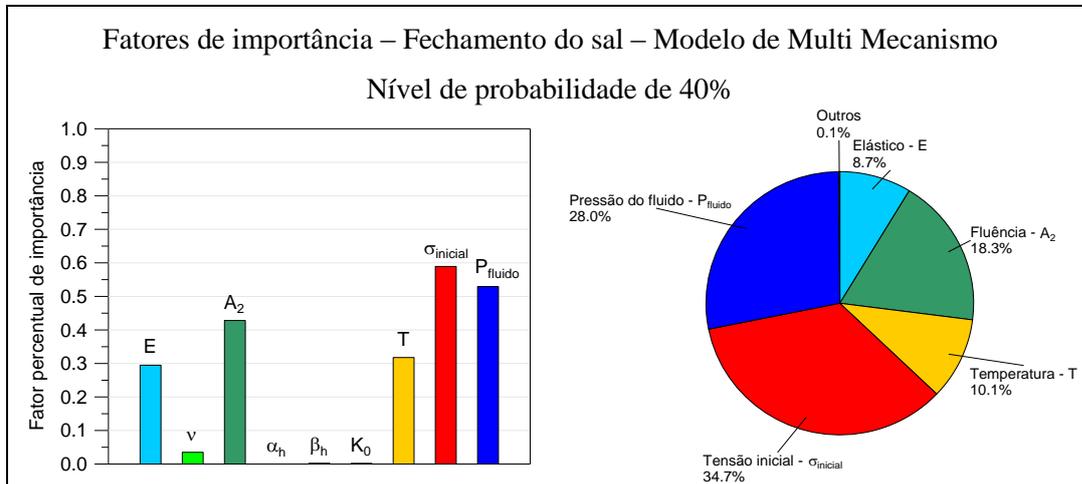


Figura 6.30 – Fatores de importância para “P40” para análise de fechamento do sal pelo Modelo de Multi Mecanismo.

A seguir, é mostrada na Figura 6.31 a superfície de resposta obtida pelo Modelo de Duplo Mecanismo. Observa-se que assim como o modelo anterior, o resultado determinístico está associado a um nível de probabilidade de 40% (“P40”).

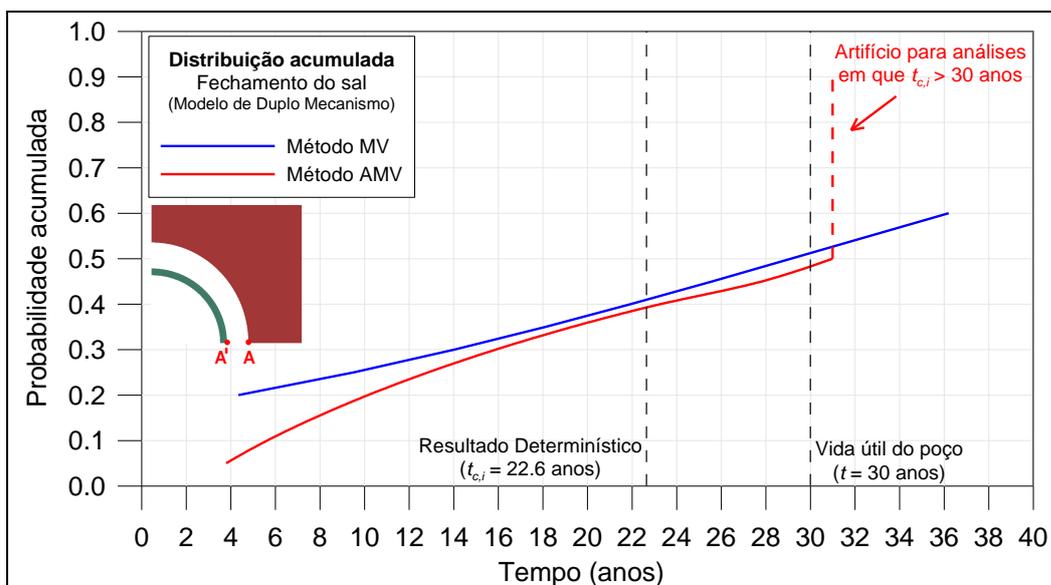


Figura 6.31 – Distribuição acumulada do fechamento do sal pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

A Figura 6.32 mostra a evolução dos fatores de importância das variáveis aleatórias com os tempos de contato obtidos para o nível de probabilidade

associado ao resultado determinístico (“P40”). Observa-se, assim como no caso anterior, que os fatores de maior importância são os parâmetros associados ao estado de tensão (tensão inicial e pressão do fluido), temperatura e o fator estrutural do mecanismo indefinido, do modelo constitutivo de fluência.

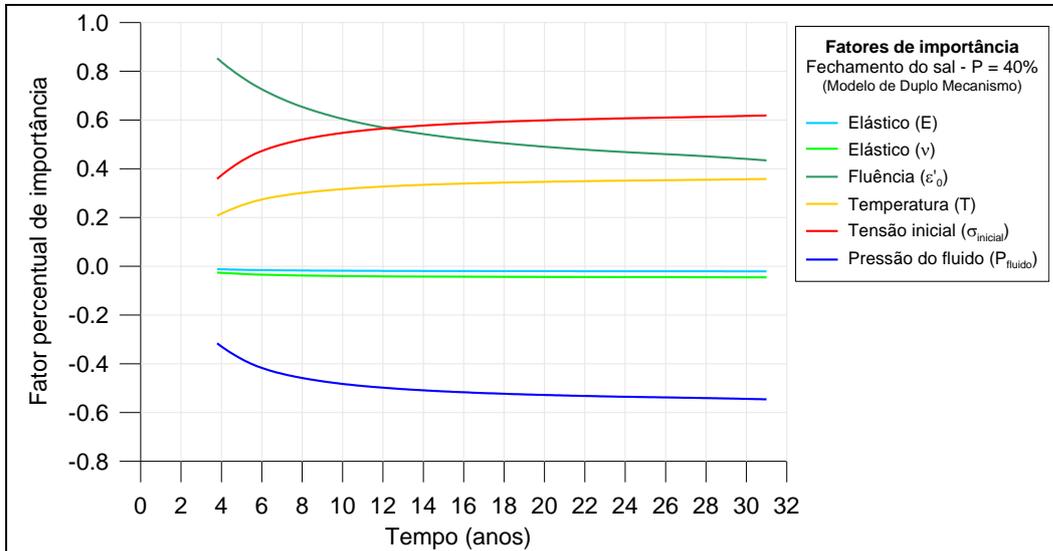


Figura 6.32 – Fatores de importância para “P40” para análise de fechamento do sal pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

A Figura 6.33 é análoga, para o mesmo nível de probabilidade, mostrando a importância percentual das variáveis aleatórias na resposta obtida.

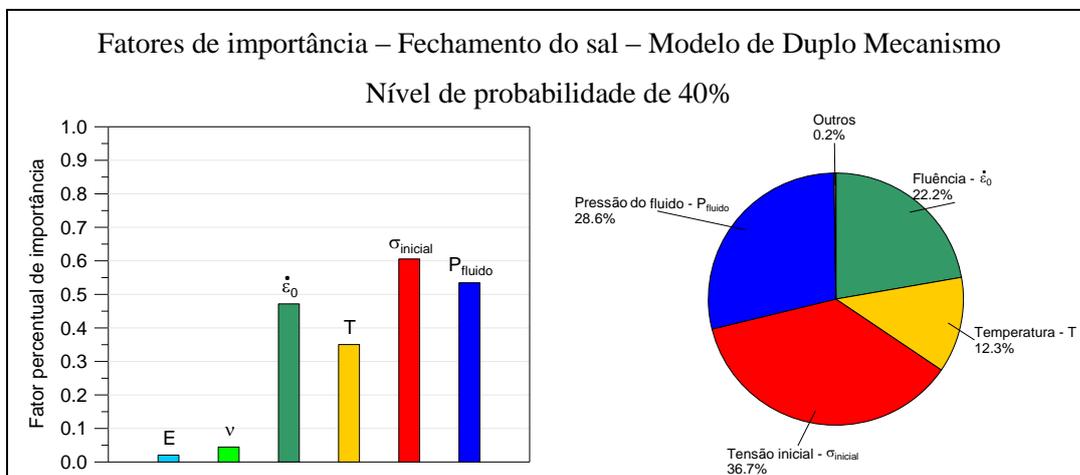


Figura 6.33 – Fatores percentuais de importância para “P40” para análise de fechamento do sal pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

Observa-se a grande dependência da análise de fechamento por fluência do sal, independente do modelo constitutivo empregado, do estado de tensões, da temperatura e de parâmetros de fluência relacionados à fase secundária. Isto é esperado, uma vez que essa fase é a que predomina em análises de longo prazo.

6.8. Análise probabilística da plastificação do revestimento

A seguir, foi realizado o procedimento análogo para a análise probabilística de plastificação do revestimento. Tratando-se de um evento que pode vir a ser proibitivo para o projeto do poço, foram empregados os métodos *MV* e *AMV* para o traçado da superfície de resposta e, para três níveis de probabilidade de interesse (10%, 40% e 50%), adotou-se também o método *AMV+*, com o intuito de verificar a curva obtida pelo método *AMV*.

Foi considerada uma tolerância de 10% na convergência dos tempos de plastificação pelo método *AMV+*, que é o valor padrão do NESSUS[®] para esse método. Tratando da verificação do método *AMV*, e não da única metodologia para obtenção da superfície de resposta, entende-se que essa tolerância é aceitável. Dessa forma, o processo iterativo do método é ativado caso o erro relativo (entre resultados) seja superior a essa tolerância.

A Figura 6.34 mostra a superfície de resposta do tempo para a primeira região plastificada pelo Modelo de Multi Mecanismo. Tratando-se de um fenômeno decorrente do fechamento do sal, verificou-se que o resultado determinístico ($t_{y,i}$) também está associado a um nível de probabilidade de 40% para o nível de incerteza atribuído as variáveis aleatórias.

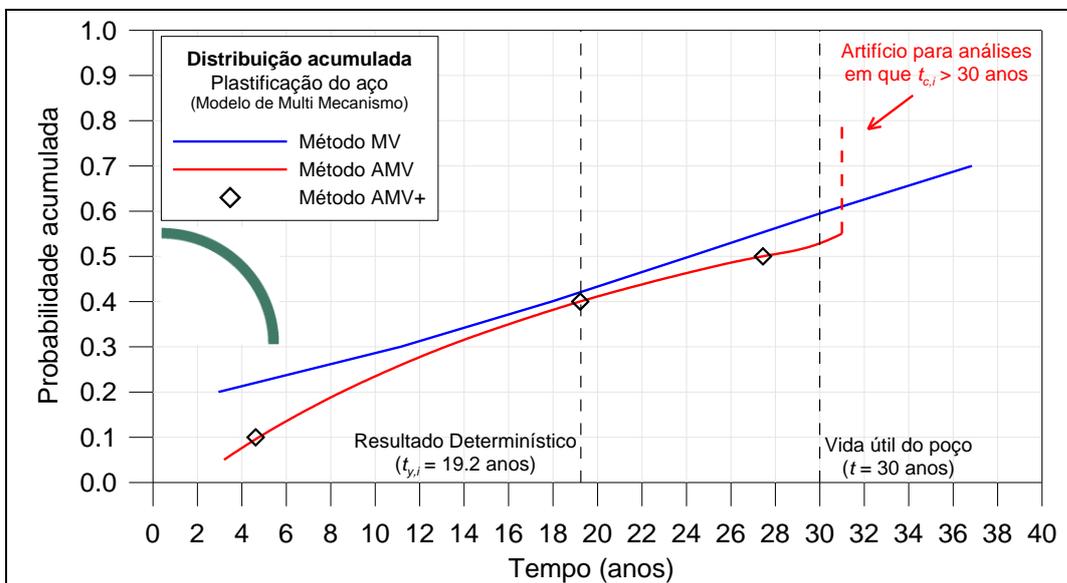


Figura 6.34 – Distribuição acumulada da plastificação do aço pelo Modelo de Multi Mecanismo.

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos por cada método probabilístico. Observa-se a verificação feita pelo método *AMV+* para os níveis com erro superior a 10%.

Tabela 6.8 – Resultados da análise probabilística de plastificação pelo Modelo de Multi Mecanismo.

Análise probabilística de plastificação – Modelo de Multi Mecanismo					
Nível de probabilidade	Tempo para a primeira região do aço plastificada ($t_{y,i}$)				
	<i>MV</i>	<i>AMV</i>	Erro	<i>AMV+</i>	Erro
10% (P10)	-9,32	4,77	48,84%	4,62	3,23%
40% (P40)	17,95	19,22	7,09%	-	-
50% (P50)	24,18	27,44	13,48%	27,44	0,00083%

A Figura 6.35 mostra os fatores de importância das variáveis aleatórias para “P40”, nível de probabilidade associado ao resultado determinístico. Naturalmente, as curvas são muito semelhantes as obtidas para o fechamento do sal.

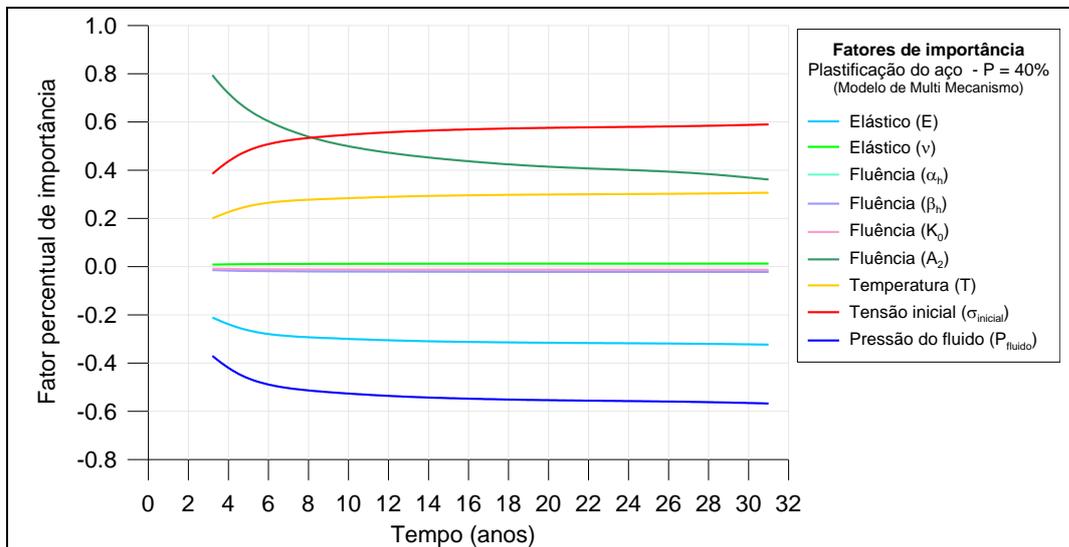


Figura 6.35 – Fatores de importância para “P40” para análise de plastificação do aço pelo Modelo de Multi Mecanismo.

A Figura 6.36 apresenta os fatores percentuais de importância para a plastificação em “P40”.

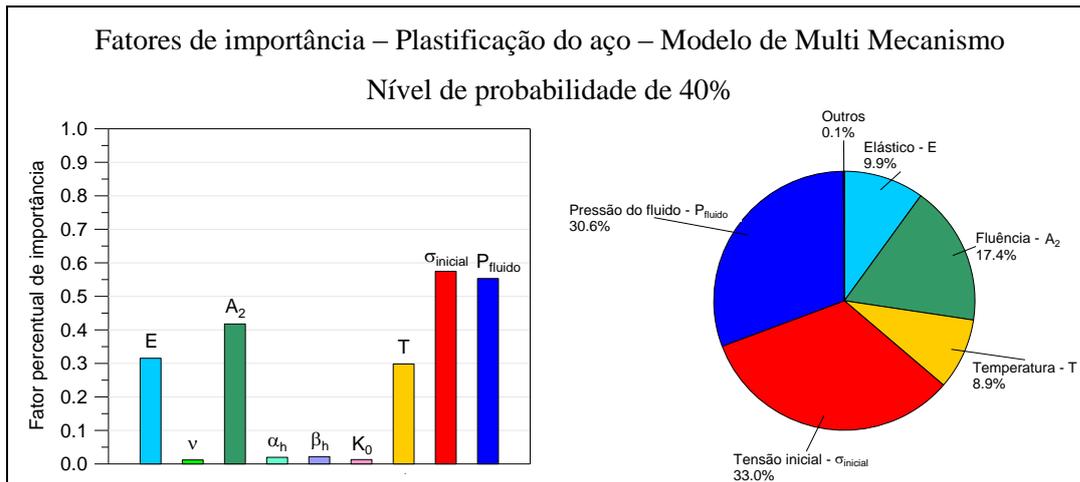


Figura 6.36 – Fatores percentuais de importância para “P40” para análise de plastificação do aço pelo Modelo de Multi Mecanismo.

Por fim, são apresentados os resultados obtidos com o Modelo de Duplo Mecanismo. A Figura 6.37 mostra as superfícies de resposta obtidas com os métodos *MV* e *AMV*, bem como os níveis de probabilidade verificados com o método *AMV+*. O resultado determinístico também está associado a um nível de probabilidade de 40%.

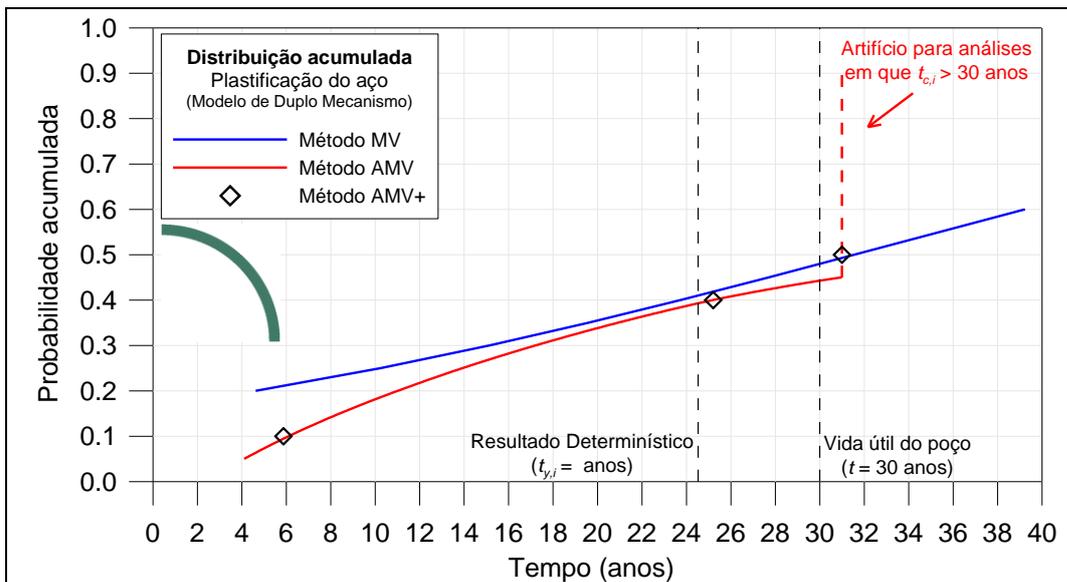


Figura 6.37 – Distribuição acumulada da plastificação do aço pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos por cada método probabilístico. Observa-se a verificação feita pelo método *AMV+* para níveis com erro superior a 10%.

Tabela 6.9 – Resultados da análise probabilística de plastificação pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

Análise probabilística de plastificação – Modelo de Duplo Mecanismo					
Nível de probabilidade	Tempo para a primeira região do aço plastificada ($t_{y,i}$)				
	<i>MV</i>	<i>AMV</i>	Erro	<i>AMV+</i>	Erro
10% (P10)	-11,70	6,11	47,77%	5,87	3,94%
40% (P40)	23,74	25,20	6,15%	-	-
50% (P50)	31,56	31,00	1,77%	-	-

São mostrados na Figura 6.38 os fatores de importância das variáveis aleatórias para “P40” e na Figura 6.39 os fatores percentuais, para o mesmo nível.

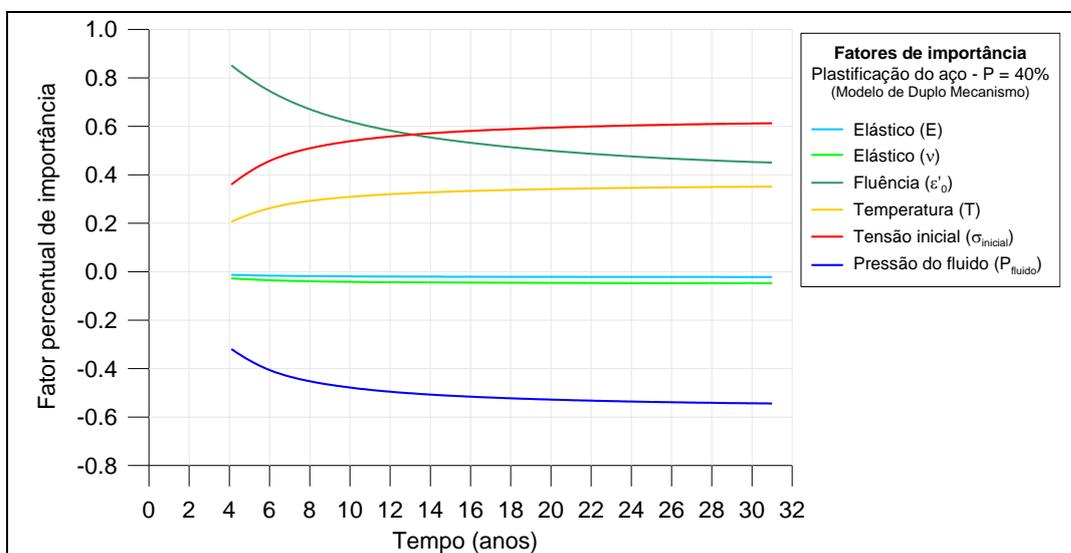


Figura 6.38 – Fatores de importância para “P40” para análise de plastificação do aço pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

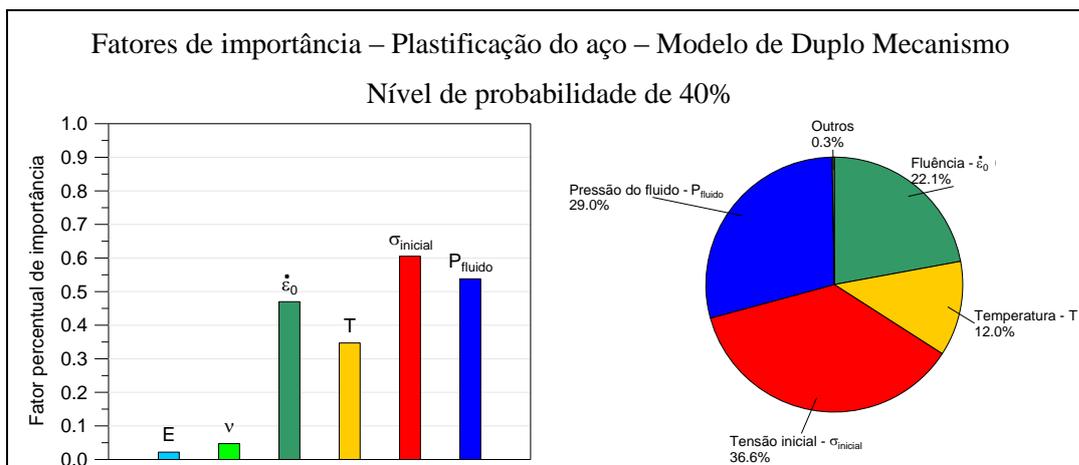


Figura 6.39 – Fatores percentuais de importância para “P40” para análise de plastificação do aço pelo Modelo de Duplo Mecanismo.

Uma vez realizadas as análises probabilísticas observa-se que para o nível de incertezas considerados nas variáveis aleatórias, os resultados determinísticos tem a probabilidade de 40% de ocorrência.

Os parâmetros mais importantes, aos quais as análises de fluência de longa duração são mais sensíveis são os relacionados ao estado de tensão e à fluência, sobretudo a secundária. Dos fatores percentuais de importância apresentados, pode-se concluir que no problema retratado, o estado de tensões influencia cerca de 65%. Uma vez que se trata de análises de fluência, observa-se que a importância do estado de tensão na simulação excede a importância dos próprios parâmetros empíricos e térmicos de fluência do material, que somam cerca de 30%.

Em termos de parâmetros de entrada do pesquisador, esses parâmetros serão determinados a partir do peso específico da litologia retratada, do peso do fluido de perfuração, dos gradientes geotérmicos e dos parâmetros que governam a fluência secundária dos modelos constitutivos. Essas variáveis devem ser cuidadosamente estimadas.

A principal diferença em termos de importância de parâmetros verificada entre os dois modelos constitutivos foi o módulo de elasticidade. Em ambos os modelos, os parâmetros elásticos são utilizados para a estimativa da deformação elástica inicial, em resposta a perfuração do maciço. Entretanto, no Modelo de Multi Mecanismo, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson também são utilizados, na forma do módulo de cisalhamento, para normalizar as tensões desviadoras. Com isso, esse modelo torna-se ainda mais sensível a esses parâmetros, com destaque para o módulo de elasticidade uma vez que o módulo de cisalhamento tem ordem de grandeza comparável a ele – e não ao coeficiente de Poisson.