



**Sergio Orozco Orozco**

**Estabilidade de Poços em Zonas de Sal  
Empregando Técnicas de Transferência de Tensões**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Co-Orientador: Dr. Nelson Inoue

Rio de Janeiro, Fevereiro de 2013



**Sergio Orozco Orozco**

## **Estabilidade de Poços em Zonas de Sal Empregando Técnicas de Transferência de Tensões**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura**  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Dr. Nelson Inoue**  
Co-orientador  
GTEP/PUC-Rio

**Prof. Celso Romanel**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Paulo Couto**  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Clemente José de Castro Gonçalves**  
CENPES/PETROBRAS

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de fevereiro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e dos orientadores.

### **Sergio Orozco Orozco**

Graduado em Engenharia de Petróleo pela UNAL (“Universidad Nacional de Colombia”) em 2005. Durante a graduação, atuou como pesquisador de iniciação científica nas áreas de Geomecânica de Reservatórios utilizando técnicas numéricas em diferenças finitas. Possui experiência profissional nas áreas de Estabilidade de Poços, Interação Química rocha-fluido, Análise de Tempos Não Produtivos durante a perfuração de poços de petróleo, Otimização de Fluidos de Perfuração e Completação, bem como no Desenvolvimento de software para a indústria do petróleo. Atualmente atua como pesquisador no Grupo de Geomecânica Computacional do GTEP – PUC-Rio na área de estabilidade de poços em zonas com presença de estruturas de sal.

#### Ficha Catalográfica

Orozco, Sergio Orozco

Estabilidade de poços em zonas de sal empregando técnicas de transferência de tensões / Sergio Orozco Orozco ; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura ; co-orientador: Nelson Inoue. – 2013.  
187 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Sal. 3. Estabilidade de poços. 4. Fluência. 5. Geomecânica. 6. Creep. 7. Transferência de tensões. 8. Elementos finitos. 9. Abaqus. 10. Submodelagem. I. Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. II. Inoue, Nelson. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.



## Agradecimentos

Meu maior agradecimento é dirigido a Deus por cada dia de vida, pela oportunidade de poder interagir com tantas pessoas que me ajudaram a crescer, pelas oportunidades oferecidas.

Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos por terem sido o continuo apoio em toda a minha vida. Eu tenho certeza que o amor em cada família representa a presença de Deus no mundo. Assim me considero abençoado por ter uma maravilhosa família.

Agradeço de um modo muito especial ao Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP), onde tive a oportunidade de crescer profissionalmente e como pessoa. Sobretudo, eu gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus grandes amigos Guilherme Righeto, Carlos Emmanuel R. Lautenschläger, Ingrid Milena Reyes, Juan David Velilla, Carla Carrapatoso, Pamela Alessandra Rodríguez, Bianca F. Lima, Sandra Rosero, Talita Miranda, Jose F. Consuegra, Constantino Niño Pinto, Vivian R. Marchesi, Rafael Albuquerque, Darwin Mateus, Ruby Lorena Hernandez, Paola Rosas, Roger Webber e Michel Felipe, pelos momentos que passamos juntos. Agradeço a Deus pelo privilégio de ter conhecido pessoas com tanta qualidade humana. Eu, verdadeiramente, fico muito honrado pela amizade de cada uma dessas pessoas, assim como muito grato pelo valioso e importante apoio recebido nos momentos difíceis e por terem me ensinado que um ideal pode ser construído em conjunto.

Agradeço ao meu orientador Sergio Augusto Barreto da Fontoura pela confiança depositada em meu trabalho e pela oportunidade de fazer parte do grupo GTEP. Agradeço também pelas inúmeras discussões técnicas, que me ajudaram a crescer e aprofundar o meu conhecimento.

Gostaria de agradecer ao meu co-orientador Nelson Inoue por ter compartilhado seus conhecimentos em análises numéricas com grande entusiasmo e paciência. Agradeço pelo seu grande apoio e pela sua amizade. Sem seu empenho não teria sido possível! “Que Deus abençoe você e sua família: Shoraia e Mateus”.

Gostaria de agradecer de maneira especial aos professores Celso Romanel e Paulo Couto, bem como ao engenheiro Clemente Gonçalves, por fazer parte da banca examinadora desta dissertação de mestrado. Eu me sinto muito honrado pela participação de cada um de vocês neste trabalho de pesquisa.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos ministrados.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ – pela concessão da bolsa de mestrado.

Agradecer a todos que ajudaram a construir esta dissertação não é tarefa fácil. O maior perigo que se coloca para o agradecimento seletivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar. Então, eu gostaria de expressar minha profunda gratidão a cada um dos meus grandes amigos, tanto brasileiros quanto estrangeiros, que de uma forma ou de outra contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas para a realização deste trabalho. Embora que quisesse mencionar a todos, muitos nomes ficaram ausentes nestas paginas. Contudo, eles nunca ficarão ausentes em meu pensamento. Cada um desses amigos refletem inúmeras boas lembranças de tantos momentos compartilhados durante este tempo no Brasil. Sou grato a Deus por ter conhecido essas pessoas que fizeram parte do caminho que eu percorri para atingir este objetivo.

Eu gostaria de finalizar com o seguinte pensamento, fazendo uma pequena homenagem ao valor da amizade: *“Uma alegria compartilhada transforma-se em dupla alegria; uma dor compartilhada transforma-se em meia dor”*. Provérbio sueco.

## Resumo

Orozco, Sergio Orozco; Fontoura, Sergio Augusto Barreto (Orientador); Inoue, Nelson (Co-Orientador). **Estabilidade de Poços em Zonas de Sal Empregando Técnicas de Transferência de Tensões.** Rio de Janeiro, 2013. 187p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A estabilidade de poços através de zonas de sal é um aspecto relevante em ambientes de perfuração *offshore* no Brasil. O fluxo convencional no planejamento de um poço de petróleo não reconhece a natureza complexa do estado de tensões *in-situ* em torno destes corpos de sal. Portanto, é necessária uma avaliação fiável das tensões *in-situ* considerando tanto a escala de campo (global) quanto as principais estruturas presentes no *overburden*. Neste trabalho, a análise de estabilidade de poços é realizada em três etapas. Primeiro, é realizada uma análise numérica a escala global para avaliar as tensões *in-situ* considerando a geometria de um corpo de sal. A seguir, são introduzidas as tensões *in-situ* em um modelo local, chamado *subestrutura*, através de duas técnicas de transferência de tensões propostas, denominadas as técnicas do *Inverso Ponderado da Distância (IPD)* e do *Gradiente de Tensões (GT)*. O termo *subestrutura* é definido como uma linha curva no espaço composta por um conjunto de pontos, se assemelhando a uma seção ou trajetória completa de um poço. Finalmente, a janela operacional do poço é calculada acoplando os resultados de tensões da modelagem numérica com equações elásticas. Neste trabalho as técnicas *IPD* e *GT* são também utilizadas para transferir tensões em *submodelos* localizados dentro de um modelo global, visando realizar futuros estudos de submodelagem de estabilidade de poços. O termo *submodelo* consiste em uma malha de elementos finitos de um tamanho menor e um refinamento maior em relação ao modelo global.

## Palavras-chave

Sal; estabilidade de poços; fluência; geomecânica; *creep*; modelo global; submodelagem; transferência de tensões; elementos finitos; Abaqus.

## Abstract

Orozco, Sergio Orozco; Fontoura, Sergio Augusto Barreto (Advisor); Inoue, Nelson (Co-Advisor) **Wellbore Stability in Salt Zones Using Stress Transfer Techniques**. Rio de Janeiro, 2013. 187p. M.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wellbore Stability drilling through salt zones is an important current endeavor in many areas offshore of Brazil. The conventional well design workflow does not recognize the complex nature of the stress field near these salt bodies. Therefore, a reliable assessment of the in-situ stresses must be carried out considering a field (global) scale of the problem and the presence of major structures in the overburden. The proposed stability analysis is carried out in three stages. Firstly, a global finite element analysis is employed to evaluate the in-situ stresses at a global scale considering the geometry of a salt body. Secondly, the global scale in-situ stresses are introduced in a local model, that we call *substructure*, by using two proposed stress transfer techniques called the *Inverse Distance Weighted Technique (IDWT)* and the *Stress Gradient Technique (SGT)*. We define *Substructure* as a set of points forming a section or a complete trajectory of an oil well. Finally, optimal mud weights are calculated combining numerical stress results with analytical elastic equations. These two stress transfer techniques are also proposed to be used to transfer stresses to *submodels* inside a global model domain for submodeling wellbore stability purposes. The term *submodel* is defined as a finite element mesh with a smaller size relative to the size of the global model.

## Keywords

Salt; wellbore stability; geomechanics; creep; global model; submodeling; stress transfer technique; finite elements; Abaqus.



# Sumário

1 Introdução	28
1.1. Relevância e Motivação do estudo	28
1.2. Objetivo e Metodologia	30
1.3. Organização da Dissertação	32
2 Revisão Bibliográfica	34
2.1. Conceitos Básicos Relativos à Estabilidade de Poços	34
2.1.1. Tensões <i>in situ</i> no Subsolo	34
2.1.2. Determinação das Tensões <i>in situ</i> na Parede de um Poço de Petróleo	35
2.1.3. Tipos de Falhas da Rocha na Parede do Poço	37
2.1.4. Pressão de Colapso e Pressão de Fratura	38
2.1.5. Estimativa do Gradiente de Fratura	39
A) Métodos Diretos	40
B) Métodos Indiretos	41
2.1.6. Considerações sobre os Métodos para a Determinação do Gradiente de Fratura	42
2.2. Aspectos Geológicos e Geomecânicos de Zonas de Sal	43
2.2.1. O Sal	43
2.2.2. O fenômeno de Fluência ou <i>Creep</i> no Sal	44
2.2.3. Propriedades Físicas do Sal	45
2.2.4. Mecânica do Movimento do Sal e Formação de Diápiros	45
2.2.5. Perturbação de Tensões <i>In Situ</i> causada pelo Movimento de Estruturas de Sal	47
2.3. Aspectos de Engenharia de Perfuração associados com Estruturas de Sal	67
2.3.1. Tempo Não Produtivo e Aparição de Eventos Indesejáveis durante a Perfuração	67
2.3.2. Zonas Sub-sal ( <i>Subsalt Rubble Zones</i> )	67
2.3.3. Variação de Tensões <i>In Situ</i> ao longo da Trajetória de um Poço de Petróleo em Ambientes com Presença de Diápiros de Sal	68
2.3.4. Perfuração através do Sal Vs. Perfuração em torno do Sal	70
2.4. Modelagem Convencional Vs. Modelagem Numérica de Estabilidade de Poços em torno de Estruturas de Sal	71

2.5. Resultados de Análises Numéricas que Evidenciam o Efeito da Perturbação de Tensões na Estabilidade de Poços	72
2.6. Panorama da Modelagem Numérica com Elementos Finitos em Modelos Globais que possuem Estruturas de Sal	77
2.7. Panorama da Modelagem Numérico-Analítica de Estabilidade Poços	83
2.8. Panorama da Modelagem Numérica na Área da Engenharia de Petróleo Empregando Técnicas de Submodelagem no Programa Abaqus	84
a) A Técnica de Submodelagem em Elementos Finitos	84
b) Vantagens da Técnica de Submodelagem em Elementos Finitos	86
c) O Princípio de Saint Venant	87
d) Estudos de Submodelagem no Programa Abaqus	89
e) Panorama de Técnicas de Submodelagem na Área da Engenharia de Petróleo utilizando o Programa Abaqus	90
3 Modelagem Numérico-Analítica de Estabilidade de Poços Empregando Técnicas de Transferência de Tensões	96
3.1. Técnicas de Transferência de Tensões	97
a) Técnica do Inverso Ponderado da Distância (IPD)	97
b) Técnica do Gradiente de Tensões (GT)	100
3.2. Modelagem Analítica de Estabilidade de Poços	101
3.3. Modelagem <i>Numérico - Analítica</i> de Estabilidade de Poços	104
3.4. Análise de Estabilidade de Poços através de Técnicas de Transferência de Tensões	108
• Construção de um Modelo Global	108
• Modelagem Numérica do <i>Creep</i> no Sal	110
• Condições de Contorno	111
• Construção da Malha de Elementos Finitos	112
• Estado Inicial de Tensões <i>In Situ</i> no <i>Modelo Global A</i>	113
• <i>Modelos Não Acoplados Vs. Modelos Acoplados com Poropressão</i>	118
• Subestrutura A	119
• Subestrutura B	120
• Determinação da Janela Operacional no Programa SEST	120
- Modelo de Análise:	121
- Critério de Ruptura e Propriedades Hidromecânicas	121
- Geometria do poço	123
- Localização dos eixos do <i>Modelo Global A</i> com relação ao Norte	124

4 Utilização de Técnicas de Transferência de Tensões para a Realização de Estudos de Submodelagem	125
4.1. Modelo Global B	126
• Estado de Tensões <i>In Situ</i> no <i>Modelo Global B</i>	129
4.2. Descrição dos <i>Submodelos</i> Adotados no <i>Modelo Global B</i>	130
• <i>Submodelo A</i>	130
• <i>Submodelo B</i>	131
• <i>Submodelo C</i>	133
5 Resultados	135
5.1. Distribuição de Tensões no <i>Modelo Global A</i> após o <i>Creep</i> no Sal	136
• Distribuição das Tensões Principais e Normais no <i>Modelo Global A</i> Após o <i>Creep</i> no Sal	138
• Distribuição das Tensões Cisalhantes no <i>Modelo Global A</i> Após o <i>Creep</i> no Sal/139	
5.2. Transferência de Tensões do <i>Modelo Global A</i> para a <i>Subestruturas A e B</i>	140
• <i>Subestrutura A</i>	140
• <i>Subestrutura B</i>	142
5.3. Resultados da Análise de Estabilidade de Poços	146
5.3.1. <i>Subestrutura A</i>	146
5.3.2. <i>Subestrutura B</i>	146
• Cenário 1: Efeito da Variação da Poropressão na Largura da Janela Operacional da <i>Subestrutura B</i>	147
• Cenário 2: Efeito da Variação da Magnitude das Propriedades Mecânicas na Largura da Janela Operacional na <i>Subestrutura B</i>	148
• Cenário 3: Efeito das Tensões Cisalhantes sobre a Largura da Janela Operacional do Poço na Zona de <i>Arenito</i> .	151
• Comparação dos Cenários A e B:	151
5.4. Transferência de Tensões do <i>Modelo Global B</i> para os <i>Submodelos A, B e C</i>	153
• <i>Submodelo A</i>	153
• <i>Submodelo B</i>	155
• Evidência de Presença de Tensões Principais Perpendiculares na Interface <i>Sal-Underburden</i> do <i>Submodelo B</i>	158

• Submodelo C	159
• Efeito do Nível de Refinamento da Malha do Modelo Global sobre os resultados da técnica do <i>IPD</i> nas Zonas de Interface do Sal	161
6 Considerações Finais	164
6.1. Conclusões	164
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	165
Referências	166
APÊNDICE	177
A. Variação das Tensões <i>In Situ</i> Iniciais no <i>Modelo Global A</i> Após o Processo do <i>Creep</i> no Sal	178
- Tensão Horizontal S11	178
- Tensão Horizontal S22	178
- Tensão Vertical S33	179
- Tensão Cisalhante S12	179
- Tensão Cisalhante S13	180
- Tensão Cisalhante S23	180
B. Deslocamentos no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>Creep</i> na Camada de Sal	181
C. Evidencia de Rotação de Tensões Principais no <i>Modelo Global B</i>	182

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Principais depósitos de sal no mundo (em vermelho) (Cruz <i>et al.</i> , 2007).....	28
Figura 1.2 – Movimento do sal e a formação de trapas de petróleo (Crossno, 2005).....	29
Figura 1.3 – Riscos geomecânicos durante a perfuração de poços associados a ambientes com presença de estruturas de sal (Wilson & Fredrich, 2005). .	30
Figura 2.1 – Tensões <i>in-situ</i> em um elemento de rocha no subsolo (Adaptado de Rocha & Azevedo, 2007). ....	34
Figura 2.2 – Representação das tensões principais no sistema cartesiano ( $X' - Y' - Z'$ ) (Adaptado de Rocha & Azevedo, 2007).....	35
Figura 2.3 – A geometria de transformação: $\alpha_w$ corresponde ao azimute do poço com relação à tensão horizontal máxima $\sigma_H$ , enquanto que $i_w$ corresponde à inclinação do poço com respeito ao eixo $Z'$ (Pasic <i>et al.</i> , 2007).....	36
Figura 2.4 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer <i>et al.</i> , 2008). ....	36
Figura 2.5 – Representação de um estado de tensões em coordenadas cilíndricas. Nota-se que as tensões normais atuando na parede do poço correspondem a tensões principais, dado que as tensões cisalhantes são iguais a zero (Adaptado de Rocha & Azevedo, 2007). ....	37
Figura 2.6 – Exemplo típico de <i>Janela Operacional</i> de um poço de petróleo (Rocha & Azevedo, 2007). ....	39
Figura 2.7 – Comportamento da pressão durante o <i>teste de microfaturamento</i> (Petrobras) (Apud Rocha & Azevedo, 2007). ....	40
Figura 2.8 – Comparação entre valores típicos de <i>pressão de absorção</i> ( <i>Leak off Pressure</i> , LOP) e os valores de tensão <i>in situ</i> mínima no Golfo de México. O eixo horizontal corresponde à profundidade (a partir da linha de lama da torre de perfuração), enquanto que o eixo vertical corresponde à razão entre a <i>pressão de absorção</i> e a tensão <i>in-situ</i> mínima (Keaney <i>et al.</i> , 2010).....	43
Figura 2.9 – Estruturas de sal típicas no subsolo (A) Sweatman <i>et al</i> 1999; (B) Modificado de Jackson & Talbot, 1991 (apud Mohriak <i>et al.</i> , 2009).....	46
Figura 2.10 – Malha em elementos finitos com esfera de sal no seu interior (Fredrich <i>et al.</i> , 2003).....	50

- Figura 2.11 – Trajetórias usadas na malha de elementos finitos para visualizar a perturbação de tensões devido ao processo de equilíbrio de tensões na esfera de sal: trajetória 1: linha vermelha; trajetória 2: linha azul; trajetória 3: linha verde (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003).....51
- Figura 2.12 – Distribuição da tensão vertical com profundidade na malha que contem a esfera de sal: trajetória 1: linha vermelha; trajetória 2: linha azul; trajetória 3: linha verde (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003). .....51
- Figura 2.13 – Distribuição da Tensão Horizontal com profundidade na malha que contem a esfera de sal: trajetória 1: linha vermelha; trajetória 2: linha azul; trajetória 3: linha verde (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003). .....52
- Figura 2.14 – Distribuição da Tensão de Von Mises com profundidade na malha que contem a esfera de sal: trajetória 1: linha vermelha; trajetória 2: linha azul; trajetória 3: linha verde (Adaptado de Fredrich *et al.*, 2003).....52
- Figura 2.15 – Perturbação do Campo de Tensões *in situ* produzido pelo diapirismo de estruturas de sal (Dusseault *et al.*, 2004b). .....54
- Figura 2.16 – Evidencia do fenômeno de rotação de tensões no entorno de estruturas de sal: (a) orientação da *Tensão Principal Máxima Total*; (b) orientação da *Tensão Principal Intermediária Total*; (c) orientação da *Tensão Principal Mínima Total* (Schutjens *et al.*, 2010).....55
- Figura 2.17 – Orientação das tensões principais nas zonas de interface do sal com os sedimentos adjacentes (Adaptado de Van der Zee *et al.*, 2011). ...56
- Figura 2.18 – Distribuição da Tensão de Von Mises no modelo global e a identificação de “*hot spots*”. Nota-se que as tensões de Von Mises estão dadas em MPa. A tensão de Von Mises é de aproximadamente 0 MPa na zona de sal, e ao mesmo tempo ocorrem zonas onde o valor da tensão de Von Mises é amplificado ou reduzido com relação ao valor da tensão de Von Mises longe da estrutura de sal (Fredrich *et al.*, 2007).....57
- Figura 2.19 – Estreitamento da Janela Operacional do poço nas vizinhanças da esfera de sal: (a) janela operacional para um poço vertical perfurado através do centro da esfera de sal; (b) janela operacional para um poço vertical perfurado próximo da região lateral da esfera. Nota-se que a linha tracejada corresponde à pressão de poros, a qual possui um valor de zero dentro do sal (Luo *et al.*, 2012a). Nota-se que a unidade *ppg* corresponde a “*pounds per gallon*”, termo inglês equivalente a lb/gal (libras por galão). .....58
- Figura 2.20 – Largura da janela operacional de poço calculada a partir de poços verticais perfurados nos arredores da esfera de sal. Nota-se o estreitamento da janela operacional do poço em torno da esfera de sal (em cor vermelho)

com relação à largura da janela operacional do poço longe da esfera de sal (Luo <i>et al.</i> , 2012a).....	59
Figura 2.21 – Evidências na literatura de presença de zonas com pressão de poros anormalmente alta em torno de estruturas de sal (a) adaptado de Sweatman <i>et al.</i> , 1999; (b) adaptado de Romo <i>et al.</i> (2007). .....	60
Figura 2.22 – Presença de zonas com pressão de poros anormalmente baixa em torno de estruturas de sal identificadas a partir de medições de MDT (Adaptado de Weatherl <i>et al.</i> , 2010). Com relação à figura, cabe destacar na que o sal é um material impermeável que não possui poropressão, portanto, a distribuição de poropressão apresentada na figura é fictícia na camada do sal.....	61
Figura 2.23 – Alteração das geopressões acima e abaixo do sal no Golfo do México (Figura adaptada, originalmente modificado de Tomasi, 2005; apud Mohriak <i>et al.</i> , 2009). .....	63
Figura 2.24 – Evidência da redução do gradiente de fratura em torno de estruturas de sal a partir de medições de <i>Testes de Integridade da Formação</i> (FIT) e <i>Testes de Absorção Clássico</i> (LOT) (Adaptado de Weatherl <i>et al.</i> , 2010).....	64
Figura 2.25 – Evidência da redução do gradiente de fratura em torno de estruturas de sal a partir de medições de <i>Testes de Integridade da Formação</i> (FIT) e <i>Testes de Absorção Clássico</i> (LOT) (Adaptado de Rohleder <i>et al.</i> , 2003).....	65
Figura 2.26 – Evidência da redução do gradiente de fratura em torno de estruturas de sal a partir de medições de <i>Testes de Integridade da Formação</i> (FIT) (Adaptado de Barker & Meeks, 2003).....	66
Figura 2.27 – Exemplo ilustrativo da variação de tensões ao longo da trajetória de três poços na presença de diápiros de sal – (a) tensão de Von Mises ao longo da trajetória dos poços, sem presença de diápiro de sal; (b) tensão de Von Mises ao longo da trajetória dos poços, com presença de diápiro de sal (Adaptado de Koupriantchik <i>et al.</i> 2005). .....	69
Figura 2.28 – Exemplo ilustrativo da variação de tensões ao longo da trajetória de um poço na presença de diápiros de sal: (a) regimes generalizados de tensões ao redor de um domo de sal; (b) gráfico de tensões para diferentes trajetórias de poços (Dusseault <i>et al.</i> , 2004b). .....	71
Figura 2.29 – Simulação de tensões em 3D a partir de um modelo geomecânico para prever o gradiente de fratura de um poço de petróleo na base do sal (Cullen <i>et al.</i> , 2010).....	73

Figura 2.30 – Gráficas do peso de lama mínimo requerido (em lb/gal) para os estados de tensões dados na Tabela 2.3: (a) a partir de estado de tensões longe da estrutura de sal; (b) a partir de estado de tensões no entorno do sal, ignorando a rotação de tensões; (c) a partir de estado de tensões em torno do sal, considerando a rotação de tensões (Wilson & Fredrich, 2005). .....	75
Figura 2.31 – <i>Modelo global 1</i> com uma esfera de sal (Fredrich <i>et al.</i> , 2003). ...	77
Figura 2.32 – <i>Modelo global 2</i> com uma folha de sal ( <i>salt sheet</i> ) (Fredrich <i>et al.</i> , 2003).....	78
Figura 2.33 – (a) <i>Modelo global 3</i> com um diápiro de sal que possui um formato de coluna; (b) <i>Modelo global 4</i> que possui um diápiro de sal com formato de coluna e uma língua de sal na sua parte superior (Fredrich <i>et al.</i> , 2003). ..	78
Figura 2.34 – (a) <i>Modelo global 1</i> com diápiro de sal idealizado (cor verde); (b) <i>Modelo global 2</i> com diápiro de sal adotado a partir de uma geometria real (Koupriantchik <i>et al.</i> , 2004). .....	79
Figura 2.35 – <i>Modelo global 3</i> que possui no seu interior uma esfera de sal (Koupriantchik <i>et al.</i> , 2005). .....	79
Figura 2.36 – <i>Modelo global</i> construído a partir de duas malhas de elementos finitos em 2D utilizando a informação de linhas sísmicas (Fredrich <i>et al.</i> , 2007).....	80
Figura 2.37 – (a) <i>Modelo global 1</i> com esfera de sal; (b) <i>modelo global 2</i> com folha de sal ( <i>salt sheet</i> ); (c) <i>modelo global 3</i> que possui um diápiro de sal com formato de coluna e uma língua de sal na sua parte superior (Mackay <i>et al.</i> , 2008a).....	80
Figura 2.38 – Esquema da modelagem numérica das tensões <i>in-situ</i> no <i>modelo global</i> (Schutjens <i>et al.</i> , 2010).....	81
Figura 2.39 – <i>Modelo global</i> adotado por Nikolinakou <i>et al.</i> (2011a).....	82
Figura 2.40 – <i>Modelo global</i> adotado por Van der Zee <i>et al.</i> (2011a).....	82
Figura 2.41 – <i>Modelos globais</i> usados por Luo <i>et al.</i> , 2012a; (a) esfera de sal; (b) estrutura de sal de formato irregular.....	83
Figura 2.42 – Janela Operacional de um poço de epróleo criada a partir dos resultados de tensões <i>in situ</i> fornecidos pelo programa Abaqus (Luo <i>et al.</i> , 2012a).....	83
Figura 2.43 – Exemplo de uma malha de elementos finitos, representando um <i>submodelo</i> . Nota-se que o <i>submodelo</i> possui um tamanho menor em relação ao tamanho do <i>modelo global</i> , bem como um nível de refinamento maior.....	85



Figura 2.44 – <i>Modelo global</i> com três contornos possíveis para três <i>submodelos</i> (Minnicino & Hopkins, 2004). .....	87
Figura 2.45 – <i>Modelo global</i> com três contornos possíveis para três <i>submodelos</i> : (a) <i>modelo global</i> ; (b) distribuição de tensões no <i>submodelo</i> de contorno 1; (c) distribuição de tensões no <i>submodelo</i> de contorno 2; (d) distribuição de tensões no <i>submodelo</i> de contorno 3 (Minnicino & Hopkins, 2004). .....	88
Figura 2.46 – (a) geometria do modelo global; (b) componentes do modelo global (Adaptado de Shen <i>et al.</i> , 2010a) .....	90
Figura 2.47 – (a) geometria do submodelo na interface do sal com o reservatório de petróleo; (b) malha entorno do poço de petróleo (Shen <i>et al.</i> , 2010a) ..	91
Figura 2.48 – (a) geometria do modelo global; (b) localização do reservatório no modelo global (zona em vermelho), (Adaptado de Shen, 2010b). .....	91
Figura 2.49 – (a) geometria do submodelo; (b) pressão aplicada na superfície interna do revestimento que encontra-se localizado no submodelo (Adaptado de Shen, 2010b). .....	92
Figura 2.50 – Geometria do submodelo (Shen <i>et al.</i> , 2010c) .....	92
Figura 2.51 – Geometria do modelo global (Shen, 2011b). .....	93
Figura 2.52 – (a) geometria do submodelo; (b) ilustração do revestimento e do cimento (Adaptado de Shen, 2011b). .....	93
Figura 2.53 – Localização dos dois poços em estudo dentro do modelo global (Shen, 2011c) .....	94
Figura 2.54 – (a) Submodelo empregado no Poço 1, correspondente a uma seção do reservatório com espessura de 0,5 m e diâmetro de 7 m; (b) submodelo empregado no Poço 2, correspondente a uma seção do reservatório com espessura de 0,5 pés e diâmetro de 7m, com 8 tiros por pé no revestimento (Shen, 2011c). .....	94
Figura 2.55 – Aspecto e distribuição de tensões no submodelo (Shen <i>et al.</i> , 2012b).....	95
Figura 2.56 – Distribuição das deformações plásticas dentro do revestimento (Shen <i>et al.</i> , 2012b).....	95
Figura 3.1 – <i>Exemplos de Subestruturas</i> .....	96
Figura 3.2 – O modelo global é dividido em oito quadrantes em torno de cada ponto da <i>subestrutura</i> para a realização da interpolação de tensões a partir da técnica do <i>IPD</i> . .....	99

Figura 3.3 – Aspecto do programa desenvolvido em Fortran utilizando a técnica do <i>IPD</i> .....	99
Figura 3.4 – Representação esquemática da técnica do <i>GT</i> .....	100
Figura 3.5 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer <i>et al.</i> , 2008). ....	101
Figura 3.6 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Fjaer <i>et al.</i> , 2008): (a) campo de tensões <i>in situ</i> no sistema de eixos ( $X' - Y' - Z'$ ) ; (b) sistema de eixos do poço ( $X - Y - Z$ ), onde o eixo do poço está alinhado com o eixo $Z$ ..	102
Figura 3.7 – A geometria de transformação: $\alpha_w$ corresponde ao azimute do poço com relação à tensão horizontal máxima $\sigma_H$ , enquanto que $i_w$ corresponde à inclinação do poço com respeito ao eixo $Z'$ (Pasic <i>et al.</i> , 2007).....	102
Figura 3.8 – Tensões em coordenadas cilíndricas (Adaptado de GTEP, 2010). .....	103
Figura 3.9 – Sistema de eixos (positivo) adotado no Abaqus para o modelo global. ....	105
Figura 3.10 – Aspecto da nova versão da calculadora pontual do programa SEST, onde pode ser ingressado o tensor de tensões completo. ....	106
Figura 3.11 – Convenção de sinais para tensões na mecânica de meios contínuos tradicional, onde tração é positiva (Adaptado de Desai & Christian, 1977).....	106
Figura 3.12 – Convenção de sinais para tensões onde compressão é positiva (Adaptado de Desai & Christian, 1977). ....	107
Figura 3.13 – Características geométricas do <i>Modelo Global A</i> . ....	109
Figura 3.14 – Condições de contorno do <i>Modelo Global A</i> : (a) faces laterais perpendiculares ao eixo $X$ , com movimento restrito na direção $X$ ; (b) faces laterais perpendiculares ao eixo $Y$ , com movimento restrito na direção $Y$ ; (c) base do modelo global com movimento restrito em todas as direções. ....	111
Figura 3.15 – (a) malha adotada no <i>Modelo Global A</i> ; (b) elemento empregado na malha (Abaqus, 2009). ....	112
Figura 3.16 – Representação das tensões principais máxima e mínima no modelo de <i>Mohr Coulomb</i> de acordo com a convenção do programa Abaqus (Adaptado de Abaqus, 2009).....	113
Figura 3.17 – Posicionamento dos planos que limitam a zona de <i>Sal</i> e o fundo do mar no <i>Modelo Global A</i> .....	115
Figura 3.18 – Convenção usada pelo Abaqus para a leitura de tensões através de sub-rotinas. ....	116

Figura 3.19 – Aplicação de reações de apoio no <i>Modelo Global A</i> : (a) estado Inicial da malha; (b) deslocamentos resultantes (metros) na malha do modelo global após a aplicação das tensões iniciais litostáticas . . . . .	117
Figura 3.20 – Distribuição de tensões <i>in situ</i> iniciais no <i>Modelo Global A</i> : (a) tensões <i>In situ</i> antes da aplicação das reações de apoio (tensão de Von Mises); (b) tensões <i>in situ</i> resultantes após a aplicação das reações de apoio (tensão de Von Mises). . . . .	117
Figura 3.21 – Localização da <i>Subestrutura A</i> (linha amarela) na seção transversal do <i>Modelo Global A</i> . . . . .	119
Figura 3.22 – Localização da <i>Subestrutura B</i> (linha verde) no <i>Modelo Global A</i> . . . . .	120
Figura 3.23 – Correlações adotadas na zona de <i>Folhelho</i> para a definição das propriedades de <i>Resistência à Tração</i> e <i>Resistência à Compressão Uniaxial</i> em função da profundidade. . . . .	122
Figura 3.24 – Correlações adotadas na zona do <i>Sal</i> e do <i>Arenito</i> para a definição das propriedades de <i>Resistência à Tração</i> e <i>Resistência à Compressão Uniaxial</i> em função da profundidade. . . . .	122
Figura 3.25 – Localização do sistema de eixos do <i>Modelo Global A</i> com relação ao Norte. . . . .	124
Figura 4.1 – Distribuição da Tensão de Von Mises em uma malha que contém uma esfera de sal. A linha vermelha corresponde a uma linha que passa pelo centro da esfera, no instante do equilíbrio do sal (Adaptado de Fredrich <i>et al.</i> , 2003). . . . .	125
Figura 4.2 – Geometria adotada para o <i>Modelo Global B</i> . . . . .	127
Figura 4.3 – Malha adotada para o <i>Modelo Global B</i> . . . . .	127
Figura 4.4 – Localização da origem de Coordenadas no <i>Modelo Global B</i> . . . . .	128
Figura 4.5 – Posicionamento dos Planos que limitam a zona do <i>Sal</i> no <i>Modelo Global B</i> . . . . .	129
Figura 4.6 – Localização do <i>Submodelo A</i> dentro do <i>Modelo Global B</i> . . . . .	130
Figura 4.7 – Malha adotada no <i>Submodelo A</i> . . . . .	131
Figura 4.8 – Localização do <i>Submodelo B</i> dentro do <i>Modelo Global B</i> . . . . .	132
Figura 4.9 – Malha adotada no <i>Submodelo B</i> . . . . .	132
Figura 4.10 – Localização do <i>Submodelo C</i> dentro do <i>Modelo Global B</i> . . . . .	133
Figura 4.11 – Malha adotada no <i>Submodelo C</i> . . . . .	134

Figura 5.1 – Convenção adotada nos gráficos de resultados.....	135
Figura 5.2 – Distribuição de tensões no <i>Modelo Global A</i> após o processo de <i>creep</i> na zona de <i>Sal</i> (Tensão de Von Mises em Pa).....	136
Figura 5.3 – Trajetória adotada no <i>Modelo Global A</i> para visualizar os resultados de tensões (seção transversal da malha).....	136
Figura 5.4 – Variação das tensões <i>in situ</i> no <i>Modelo Global A</i> após o processo de <i>creep</i> no <i>Sal</i> .....	137
Figura 5.5 –Tensões principais máxima, intermediária e mínima no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> .....	138
Figura 5.6 – Tensões Normais S11, S22 e S33 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> .....	138
Figura 5.7 – Variação das tensões cisalhantes S12, S13 e S23 no <i>Modelo Global A</i> após o processo de <i>creep</i> no <i>Sal</i> .....	139
Figura 5.8 – Validação da transferência de tensões na <i>Subestrutura A</i> (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do <i>Modelo Global A</i> ; direita: <i>Subestrutura A</i> ).....	140
Figura 5.9 – Tensões transferidas do <i>Modelo Global A</i> para a <i>Subestrutura A</i> a partir da técnica do <i>IPD</i> .....	141
Figura 5.10 – <i>Subestrutura A</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Arenito</i> .....	141
Figura 5.11 – <i>Subestrutura A</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Arenito</i> e pontos corrigidos a partir da técnica do <i>GT</i> .....	142
Figura 5.12 – Validação da transferência de tensões na <i>Subestrutura B</i> (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do <i>Modelo Global A</i> ; direita: <i>Subestrutura B</i> ).....	142
Figura 5.13 – Tensões transferidas do <i>Modelo Global A</i> para a <i>Subestrutura B</i> a partir da técnica do <i>IPD</i> .....	143
Figura 5.14 – <i>Subestrutura B</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Folhelho</i> .....	144
Figura 5.15 – <i>Subestrutura B</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Arenito</i> .....	144
Figura 5.16 – <i>Subestrutura B</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Folhelho</i> e pontos corrigidos a partir da técnica do <i>GT</i> .....	145
Figura 5.17 – <i>Subestrutura B</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Arenito</i> e pontos corrigidos a partir da técnica do <i>GT</i> .....	145
Figura 5.18 –Janela operacional do poço na <i>Subestrutura A</i> .....	146
Figura 5.19 – Efeito do aumento da poropressão sobre a largura da janela operacional do poço na <i>Subestrutura B</i> : (a) Gradiente de Poropressão Hidrostático; (b) Gradiente de Poropressão maior que o Hidrostático.....	148

Figura 5.20 – Efeito da variação das propriedades mecânicas sobre a largura da Janela Operacional na <i>Subestrutura B</i> : (a) variação da <i>Resistência à Tração</i> ; (b) variação da <i>Resistência à Compressão Uniaxial</i> . .....	149
Figura 5.21 – Efeito da presença de tensões cisalhantes sobre a largura da janela operacional na zona do <i>Arenito</i> da <i>Subestrutura B</i> (Cenários A e B). .....	152
Figura 5.22 – Distribuição da tensão de Von Mises no <i>Submodelo A</i> após a transferência de tensões do <i>Modelo Global B</i> (tensão de Von Mises em Pa): (a) técnica do <i>IPD</i> ; (b) técnica do <i>GT</i> . .....	153
Figura 5.23 – Validação da transferência de tensões no <i>Submodelo A</i> (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do <i>Modelo Global B</i> ; direita: trajetória adotada na seção transversal do <i>Submodelo A</i> ) .....	154
Figura 5.24 – Resultados da transferência de tensões do <i>Modelo Global B</i> para o <i>Submodelo A</i> (Tensão de Von Mises). .....	154
Figura 5.25 – Detalhe no <i>Submodelo A</i> (faixa de profundidade: 5000 – 5010 m). .....	155
Figura 5.26 – Distribuição de tensões no <i>Submodelo B</i> após a transferência de tensões do <i>Modelo Global B</i> (tensão de Von Mises em Pa): (a) técnica do <i>IPD</i> ; (b) técnica do <i>GT</i> . .....	156
Figura 5.27 – Validação da transferência de tensões no <i>Submodelo B</i> (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do <i>Modelo Global B</i> ; direita: trajetória adotada na seção transversal do <i>Submodelo B</i> ) .....	156
Figura 5.28 – Resultados da transferência de tensões do <i>Modelo Global B</i> para o <i>Submodelo B</i> (Tensão de Von Mises). .....	157
Figura 5.29 – <i>Submodelo B</i> : Detalhe da interface <i>Sal-Underburden</i> (Faixa de profundidade: 5814 – 5824 m). .....	157
Figura 5.30 – Orientação das tensões principais máxima, intermediária e mínima na interface <i>Sal-Underburden</i> do <i>Submodelo B</i> : (a) vista Y-Z; (b) vista X-Z. .....	158
Figura 5.31 – Distribuição de tensões no <i>Submodelo C</i> após a transferência de tensões a partir do <i>Modelo Global B</i> (Tensão de Von Mises em Pa). .....	159
Figura 5.32 – Validação da transferência de tensões no <i>Submodelo C</i> (esquerda: trajetória adotada na seção transversal do <i>Modelo Global B</i> ; direita: trajetória adotada na seção transversal do <i>Submodelo C</i> ) .....	160
Figura 5.33 – Resultados da transferência de tensões do <i>Modelo Global B</i> para o <i>Submodelo C</i> (tensão de Von Mises) .....	160
Figura 5.34 – Detalhe das interfaces <i>Sal-Overburden</i> e <i>Sal-Underburden</i> . .....	161

Figura 5.35 – Aspecto da nova malha criada no <i>Modelo Global B</i> com um nível de refinamento maior. ....	162
Figura 5.36 – Efeito do nível de refinamento na malha do <i>Modelo Global B</i> sobre a qualidade/exatidão dos resultados obtidos nas interfaces do <i>Sal</i> com os seus arredores. ....	163
Figura A.1 – Variação da Tensão Horizontal S11 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	178
Figura A.2 – Variação da Tensão Horizontal S22 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	178
Figura A.3 – Variação da Tensão Vertical S33 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	179
Figura A.4 – Variação da Tensão Cisalhante S12 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	179
Figura A.5 – Variação da Tensão Cisalhante S13 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	180
Figura A.6 – Variação da Tensão Cisalhante S23 no <i>Modelo Global A</i> após o processo do <i>creep</i> no <i>Sal</i> . ....	180
Figura B.1 – Deslocamentos finais após o <i>creep</i> na zona de <i>Sal</i> no <i>Modelo Global A</i> : (a) deslocamentos na direção horizontal X (U1); (b) deslocamentos na direção horizontal Y (U2); (c) deslocamentos na direção vertical Z (U3). ....	181
Figura C.1 – Orientação da Tensão Principal Máxima no <i>Modelo Global B</i> antes do processo de <i>creep</i> no sal (Paralela ao eixo Z): (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) interface <i>Sal-Underburden</i> do modelo global (plano Y-Z). ....	182
Figura C.2 – Orientação da Tensão Principal Máxima no <i>Modelo Global B</i> depois do processo de <i>creep</i> no sal: (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) Interface <i>Sal-Underburden</i> do modelo global (plano Z-Y). ....	183
Figura C.3 – Orientação da Tensão Principal Intermediária no <i>Modelo Global B</i> antes do processo de <i>creep</i> no Sal (paralela ao eixo Y): (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) interface <i>Sal-Underburden</i> do modelo global. ..	184

Figura C.4 – Orientação da Tensão Principal Intermediária no *Modelo Global B* depois do processo de *creep* no Sal: (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) Interface *Sal-Underburden* do modelo global..... 185

Figura C.5 – Orientação da Tensão Principal Mínima no *Modelo Global B* antes do processo de *creep* no Sal (paralela ao eixo X): (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) Interface *Sal-Underburden* do modelo global... 186

Figura C.6 – Orientação da Tensão Principal Mínima no *Modelo Global B* depois do processo de *creep* no Sal: (a) modelo global completo (plano Y-Z); (b) Interface *Sal-Underburden* do modelo global. .... 187

## Lista de Quadros

Quadro 5.1 – Critérios assumidos por alguns autores na literatura para estabelecer o equilíbrio na zona de <i>Sa</i> após o processo de <i>creep</i> . .....	137
Quadro 5.2 – Cenários utilizados para a criação da janela operacional na <i>Subestrutura B</i> a partir da análise qualitativa de alguns parâmetros. ....	147
Quadro 5.3 – Cenários adotados para a estudar qualitativamente o efeito da presença de tensões cisalhantes sobre a largura da Janela Operacional na <i>Subestrutura B</i> na zona de Arenito. ....	151



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Taxa de fluência (pol/h) por tipo de sal e pela densidade do fluido de perfuração para uma mesma condição de pressão e temperatura (Costa <i>et al.</i> , 2005; apud Mohriak <i>et al.</i> , 2009) .....	45
Tabela 2.2 – Regressão do gradiente de fratura sub-sal estimado a partir da análise numérica utilizando o método dos elementos finitos (Fredrich <i>et al.</i> , 2007).....	74
Tabela 2.3 – Parâmetros usados na análise de estabilidade de poços tanto nas vizinhanças da estrutura de sal quanto a uma distância significativa da estrutura de sal (Wilson & Fredrich, 2005). .....	76
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas dos materiais do <i>Modelo Global A</i> . .....	110
Tabela 3.2 – Equações usadas para o cálculo das tensões <i>in situ</i> iniciais no <i>Modelo Global A</i> , correspondente a um regime de falhamento normal. ...	115
Tabela 3.3 – Propriedades e parâmetros necessários para realizar a análise de estabilidade de poços no programa SEST. ....	121
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos materiais do <i>Modelo Global B</i> . .....	128
Tabela 4.2 – Equações utilizadas para o cálculo das tensões <i>in situ</i> iniciais no <i>Modelo Global B</i> , correspondente a um regime de falhamento normal. ...	129
Tabela 4.3 – Comparação do refinamento do <i>Modelo Global B</i> x <i>Submodelo A</i> . .....	131
Tabela 4.4 – Comparação do refinamento do <i>Modelo Global B</i> x <i>Submodelo B</i> . .....	132
Tabela 4.5 – Comparação do refinamento do <i>Modelo Global B</i> x <i>Submodelo C</i> . .....	134
Tabela 5.1 – Variação, em <i>lb/gal</i> , dos gradientes de <i>Fratura Superior</i> e <i>Colapso Inferior</i> nas zonas do <i>Modelo Global A</i> .....	150
Tabela 5.2 – Comparação entre os níveis de refinamento da malha inicial no <i>Modelo Global B</i> versus a nova malha construída.....	162

## Lista Símbolos

$\gamma$	Gravidade Especifica.
$\gamma_{overb}$	Gravidade Especifica do <i>Overburden</i> no Modelo Global.
$\gamma_{sal}$	Gravidade Especifica do Sal no Modelo Global.
$\gamma_{underb}$	Gravidade Especifica do <i>Underburden</i> no Modelo Global.
C3D8	Elemento finito continuo hexaédrico de 8 nós, segundo notação do programa Abaqus.
IPD	Técnica do Inverso Ponderado da Distância
GT	Técnica do Gradiente de Tensões
G.C.I.	Gradiente de Colapso Inferior.
G.F.S.	Gradiente de Fratura Superior.

*“Where There’s a Will, There’s a Way...”*  
*English Proverb*