UNIVERSIDADE POSITIVO

Eduardo Andriola Nahorny

Rafael Luis Gruber

ANÁLISE DE PERFIL TUBULAR DE AÇO PREENCHIDO COM CONCRETO APLICADO À CONSTRUÇÃO DE TORRES TRELIÇADAS

Curitiba

Outubro - 2013

Eduardo Andriola Nahorny

Rafael Luis Gruber

ANÁLISE DE PERFIL TUBULAR DE AÇO PREENCHIDO COM CONCRETO APLICADO À CONSTRUÇÃO DE TORRES TRELIÇADAS

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo como parte dos requisitos para graduação sob orientação do Prof. Juliano J. Scremin.

Curitiba

Outubro - 2013

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS 5
LiSTA DE SÍMBOLOS 8
1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Justificativa 11
1.2 Objetivos 13
1.2.1 Objetivo geral 13
1.2.2 Objetivos específicos 13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
2.1 Perfil de aço em torres metálicas 14
2.2 Concreto 15
2.2.1 Dosagem do concreto. 19
2.2.2 Slump test 20
2.3 Barra comprimida mista Aço-Concreto 21
2.4 Normatização das estruturas tubulares de aço 23
2.5 Aderência entre os materiais aço-concreto 25
2.6 Estado geral de tensões 27
2.6.1 Tensões principais. 29
2.6.2 Invariantes dos tensores das tensões. 31
2.7 Critérios de falha 32
2.7.1 Teoria de Von Mises 33
2.7.2 Teoria de Willam-Warnke 34
2.8 Modelagem computacional 36
2.8.1 Método dos Elementos finitos 36
2.8.1.1 Funções de interpolação. 38
2.8.1.2 Determinação das propriedades dos elementos. 38

2.8.2 Software utilizado para a modelagem computacional. 40
2.8.3 Elemento escolhido para modelagem computacional. 41
3 MATERIAIS E MÉTODOS 43
3.1 Modelagem computacional 43
3.2 Ensaios em laboratório. 47
3.2.1 Materiais utilizados nos ensaios de perfis tubulares metálicos preenchidos com concreto. 47
3.2.2 Traço do concreto utilizado no ensaio. 48
3.2.3 Moldagem dos corpos de prova. 50
3.2.4 Ensaio dos corpos de prova. 52
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 58
4.1 Resultados Obtidos dos ensaios práticos 58
4.2 Análise dos resultados dos ensaios de laboratório 60
4.2.1 Determinação da resistência do tubo vazio 61
4.2.2 Determinação da resistência do tubo preenchido 62
4.2.2.1 Hipótese 01 62
4.2.2.2 Hipótese 02 62
4.2.2.3 Hipótese 03 63
4.2.3 Estimativa da deformação no início de escoamento do perfil tubular. 63
4.3 Resultados obtidos do ensaio computacional 64
4.4 Determinação da resistência do concreto 72
4.4.1 Comparação dos resultados 72
4.4.1.1 Sequencia de cálculo para pilares mistos segundo a norma brasileira NBR8800/2008 73
4.4.1.2 Relação de forças de compressão em comparação com a soma algébrica dos elementos 74
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78

APÊNDICE 81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Diagrama de Tensão x Deformação do aço 15

Figura 2-2 - Deformações longitudinais e transversais do elemento devido à aplicação de uma carga concentrada.....17

Figura 2-3 - Elemento Inelástico e elástico após o carregamento.....17

Figura 2-4 - Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal. 17

Figura 2-5 - Diagrama do módulo de elasticidade do concreto. 18

Figura 2-6 - Gráfico da curva de Adams 19

Figura 2-7 - Slump test.....20

Figura 2-8 - Confinamento do concreto em perfis de aço. 23

Figura 2-9 - Identificação das áreas do tetraedro.....27

Figura 2-10 - Forças e Tensões atuantes no tetraedro 28

Figura 2-11 - Representação dos eixos e tensões principais.....29

Figura 2-12 – Tensões quaisquer de um elemento.....30

Figura 2-13 - Tensões principais.....31

Figura 2-14 - Teoria de Von Mises.....34

Figura 2-15 - Plano desviador (ou seção desviadora) da superfície de falha.....35

Figura 2-16 - Representação da discretização por elementos finitos.....37

Figura 2-17 - Exemplos de elementos tridimensionais.....37

Figura 2-18 - Exemplos de malhas de elementos finitos.....38

Figura 2-19 - Elemento SOLID187.....42

Figura 3-1 - Tela Principal do Software ANSYS.....44

Figura 3-2 - Escolha do tipo de elemento.....44

Figura 3-3 - Definição das características dos materiais.....45

Figura 3-4 - Modelagem do tubo preenchido.....45

Figura 3-5 - Ferramenta "Glue" 46
Figura 3-6 - Definição das restrições e do carregamento 46
Figura 3-7 - Simulação do carregamento 47
Figura 3-8 - Tubo de aço 47
Figura 3-9 - Aditivo plastificante 48
Figura 3-10 - Concreto homogeneizado 51
Figura 3-11 - "Slump test" 51
Figura 3-12 - Corpos de prova 52
Figura 3-13 - Corpos de prova ensaiados 53
Figura 3-14 - Corpo de prova na prensa 53
Figura 3-15 – Comparação de tubos ensaiados e não ensaiados. 54
Figura 3-16 – Comparação dos ensaios: 54
Figura 3-17 - Ensaios 1, 2, 3, 4 e um tubo sem ensaiar. 55
Figura 3-18 - Tubo sendo ensaiado 55
Figura 3-19 - Achatamento dos tubos 56
Figura 3-20 - Deformação de tubo preenchido (Esquerda) e vazio (Direita) 56
Figura 3-21 - Corpos de prova de concreto rompidos 57
Figura 4-1 - Ensaios com tubos vazios 58
Figura 4-2 - Ensaios com tubos preenchidos 59
Figura 4-3 - Representação gráfica da curva média do módulo de elasticidade do elemento misto. 60
Figura 4-4 - Representação gráfica da curva média do módulo de elasticidade do elemento vazado. 61
Figura 4-5 - Carregamento: Passo 1 64
Figura 4-6 - Carregamento: Passo 2 65
Figura 4-7 - Carregamento: Passo 3 65
Figura 4-8 - Carregamento: Passo 4 com deslocamento de 0,05mm 66

Figura 4-9 - Carregamento: Passo 5 66
Figura 4-10 - Carregamento: Passo 6 67
Figura 4-11 - Carregamento: Passo 7 67
Figura 4-12 - Carregamento: Passo 8 68
Figura 4-13 - Carregamento: Passo 9 68
Figura 4-14 - Carregamento: Passo 10 69
Figura 4-15 - Carregamento: Passo 11 69
Figura 4-16 - Carregamento: Passo 12 70
Figura 4-17 - Carregamento: Passo 13 70
Figura 4-18 - Carregamento: Passo 14 71
Figura 4-19 - Carregamento: Passo 15 71

LISTA DE SÍMBOLOS

α	-	Coeficiente para seções circulares da NBR 8800/2008.
E	-	Módulo de elasticidade do aço.
F	-	Força.
σ	-	Tensão.
ε	-	Deformação.
fc	-	Resistência do concreto a compressão.
ft	-	Resistência do concreto a tração.
fb	-	Resistência do concreto a compressão equibiaxial.
Eci	-	Módulo de deformação tangente inicial.
Ecs	-	Módulo secante
fck	-	Resistência característica à compressão do concreto.
Fy	-	Resistência ao escoamento do aço.
Fu	-	Resistência à ruptura do aço.
S	-	Coeficiente de segurança
Δ_A	-	Área da face.
λ	-	Cosseno diretor;
τ	-	Tensão de cisalhamento.
σ_n	-	Tensão normal.
δ	-	Deslocamento.
$\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z$	-	Tensão normal nos eixos x, y e z.
τ_x,τ_y,τ_z	-	Tensores de tensões.
$\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$	-	Tensões principais.
I_1,I_2,I_3	-	Invariantes.
J_1,J_2,J_3	-	Invariantes do tensor desviador.

r	-	Raio
r_c, r_t	-	Raio nos meridianos.
$\{f\}^e$	-	Vetor dos carregamentos nodais.
$[k_R]^e$	-	Matriz de rigidez dos elementos.
$\{d\}^e$	-	Vetor dos graus de liberdade nodais.
Av	-	Área da seção do tubo vazado.
Nrd,pl	-	Força axial resistente de cálculo.
σ_{ys}	-	Tensão de escoamento do aço.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas metálicas têm sido utilizadas na construção civil desde o século XII, quando funcionavam apenas como peças auxiliares em estruturas de madeira. Nos séculos seguintes, com o desenvolvimento dos sistemas estruturais, o aço passou gradualmente a figurar como o principal material de construção em diversas obras importantes como: pontes, torres, etc. No início do século XX passou a ser empregado na construção de arranha-céus, dessa forma o aço conquistou um papel de destaque na construção civil. (SILVA, 2006)

Por outro lado, o outro material de construção que compete com o aço na construção de obras de maior vulto é o concreto armado. A possibilidade de moldagem “in loco”, ou seja, no canteiro da obra, favorece a conformação de formas geométricas diversas o que aliado à alta durabilidade e a baixa necessidade de cuidados de manutenção em comparação com o aço garante ao concreto primazia na construção civil brasileira.

O aço tem como vantagens o processo industrial de fabricação das peças, garantindo homogeneidade de propriedades e controle de qualidade mais rigoroso, como também, a possibilidade de execução das obras em tempo reduzido dado o processo de montagem sem necessidade de moldar os elementos estruturais no canteiro.

A constante realização de estudos destes materiais tem levado a criação de novas técnicas de construção e novas concepções de emprego dos mesmos, como por exemplo, as estruturas mistas. Nelas, os dois materiais são associados sem relegar ao aço o papel de mero coadjuvante, necessário para resistir às solicitações de tração, como acontece no concreto armado. (SILVA, 2006)

Segundo De Nardin et al., 2008, um exemplo interessante de estruturas mistas são os pilares de concreto revestidos de aço, o que aparentemente representa uma inversão de papéis, levando o aço a revestir o concreto. Muitos questionamentos podem ser levantados quanto à utilidade de tal inversão, porém ao pensarmos em peças de base de estruturas treliçadas como torres metálicas tubulares, evidenciamos algumas vantagens, as quais são:

- o aumento da estabilidade das peças estruturais pelo aumento da inércia da seção transversal e consequente aumento do raio de giração;

- melhoria nos modos de vibração da estrutura;

- maior resistência a efeitos térmicos oriundos de incêndios, quando comparado a estruturas metálicas de tubos vazados;

- maior resistência à compressão da peça em comparação com o tubo vazado.

Neste sentido, o presente trabalho propõe a elaboração de um modelo computacional baseado no método dos elementos finitos e desenvolvido por meio do software ANSYS®, cujos resultados serão comparados com ensaios físicos.

1.1 Justificativa

Na construção civil brasileira, devido à cultura do uso do concreto armado, os materiais mais utilizados nas obras são o aço e o concreto. Entretanto, com o crescimento econômico do país, cada vez mais deixamos de ser apenas exportadores de minério de ferro e passamos a consumir mais o aço como material principal nas nossas construções e não simplesmente como reforço do concreto. Sendo assim, abre-se campo para novas ideias quanto à utilização dos materiais, ao ponto de vislumbrar uma inversão de papéis, ou seja, utilizar o aço como material principal e o concreto como material de reforço. Esta possibilidade é bastante plausível quando falamos em estruturas treliçadas de grande porte, como por exemplo, torres de transmissão de energia elétrica e torres de telecomunicação feitas com perfis tubulares.

Estas torres estão sendo construídas em varias regiões do país, distantes dos grandes centros. Muitas destas serão instaladas em locais de difícil acesso como áreas de preservação ambiental, reservas indígenas, serras, vales, etc. Ocasionalmente, estas torres sofrem acidentes seja pela a ação do homem ou por intempéries, entrando em colapso.

Sendo assim, percebeu-se a necessidade de fornecer uma alternativa para projetos e construções de torres metálicas, visando maior segurança e confiabilidade.

Neste contexto, a composição de estruturas mais seguras significa evitar prejuízos com a interrupção do fornecimento de energia ou com falhas no sistema de comunicação. Com foco neste ganho de segurança, o presente trabalho justifica-se pela fragilidade que as estruturas metálicas de torres em cantoneiras em geral apresentam em relação a efeitos térmicos oriundos de incêndios. Além disso, a ideia de agregar o concreto como material de reforço em estruturas metálicas tubulares possibilita melhores condições de estabilidade da estrutura no tocante a vibrações devido a cargas de vento, e assim, aumentando as chances de uma linha de transmissão continuar operando mesmo com alguma avaria, reduzindo o tempo de interrupção destas para fins de manutenção.

Como exemplo desta fragilidade no sistema de transmissão elétrica, destacamos uma reportagem da revista Exame (Março 2013), onde é feita uma abordagem da ocorrência de falhas no sistema elétrico brasileiro. Nos últimos cinco anos, ocorreram cerca de 2.500 falhas anuais, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Destas, aproximadamente 15% com corte no fornecimento de energia acima de 100MW. Outro exemplo destas falhas, que repercutiu na mídia e foi noticiado pela própria revista Exame (Setembro 2013), foi a interrupção no fornecimento de energia elétrica no nordeste do Brasil, motivada por queimadas no interior do Piauí. Estas queimadas geraram instabilidade nas torres de transmissão do sistema elétrico que vieram a ruina. Os prejuízos por conta deste “apagão” foram próximos a cinquenta milhões de reais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar um perfil tubular metálico preenchido com concreto e submetido ao esforço de compressão no tocante ao seu ganho de resistência com a interação dos dois materiais, ou seja, o aço e o concreto, observando o comportamento dos mesmos em conjunto.

1.2.2 Objetivos específicos

Modelar computacionalmente um elemento misto (tubo de aço preenchido com concreto), de tal modo que o mesmo simule o elemento na realidade.

Executar ensaios com corpos de provas de tubo de aço e de concreto isoladamente, bem como do elemento misto.

Comparar os resultados obtidos nos ensaios do perfil tubular preenchido com concreto, do perfil tubular metálico vazado e do modelo computacional.

Analisar o comportamento da resistência do conjunto, uma vez que estão submetidos ao mesmo carregamento e estão "conectados" formando um sistema misto, através do modelo computacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perfil de aço em torres metálicas

Para as torres metálicas de transmissão de energia elétrica e telecomunicações, ao longo das décadas, estudos têm sido realizados a fim de desenvolver soluções que evitem a ocorrência da flambagem sucessiva dos elementos comprimidos destas estruturas. (SOUZA, 1998)

Segundo SCHMIDT et al. (1976), alguns mecanismos de colapso podem ocasionar a instabilidade repentina das estruturas através de rupturas iniciais, gerando deformações. Na utilização de índices de esbeltez usuais (solução padrão) nos projetos, a flambagem nos perfis comprimidos gera a perda de estabilidade repentina dos elementos da estrutura. (SOUZA, 1998)

A ductilidade é uma característica fundamental nos perfis tubulares metálicos, esta permite ao aço deformar plasticamente sem ruptura. Além da ductilidade, a distribuição de esforços destes elementos garante uma melhoria considerável no comportamento destas estruturas. (DE NARDIN, 1999)

Dependendo do tipo da fabricação do perfil de aço, o gráfico do módulo de elasticidade pode ter comportamento diferente. Para perfis de aço carbono laminados a quente, o gráfico tensão x deformação apresenta o patamar de escoamento bem definido, já nos trabalhados a frio, o gráfico tensão x deformação apresenta um escoamento gradual, sem um patamar de escoamento definido. (DE NARDIN, 1999)

Na Figura 2-1a, é apresentado o diagrama de tensão x deformação para aço de escoamento definido, na Figura 2-1b, é apresentado o diagrama de tensão x deformação do aço com escoamento gradual.

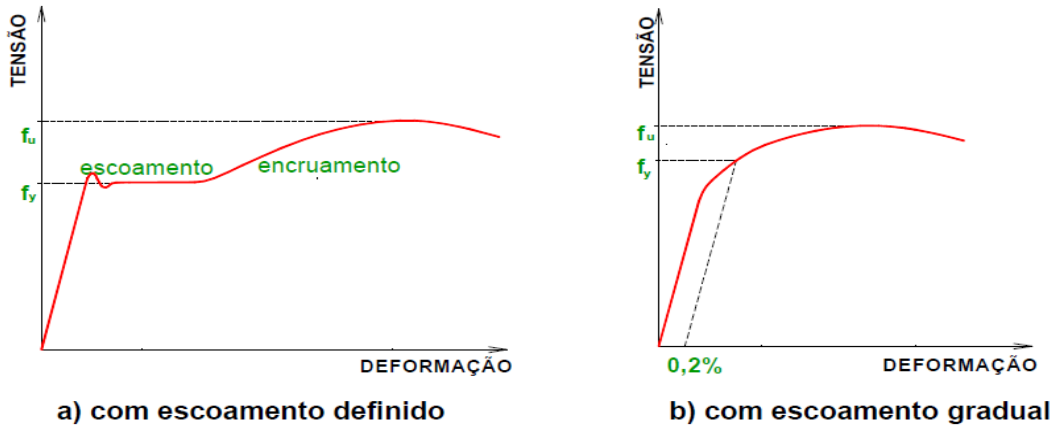

Figura 2-1 - Diagrama de Tensão x Deformação do aço

Fonte: De Nardin, 1999

A variação do módulo de elasticidade do aço (Es) é pequena, desta forma a Norma NBR 8800/2008 sugere que seja adotado um valor pré-definido de 210.000 MPa.

Analogamente, a fórmula do módulo de elasticidade relaciona a tensão com a deformação do aço. Esta pode ser definida pela seguinte equação:

$$\sigma = \mathrm{E}.\,\varepsilon \qquad (2\text{-}1)$$

Onde:

σ = Tensão (MPa)

E = Módulo de elasticidade do Aço (MPa)

ε = Deformação (adimensional)

2.2 Concreto

A mistura de materiais como o cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e água, compõe a receita de um componente muito utilizado na construção civil: o concreto. O concreto pode ser preparado com inúmeras variações de suas propriedades: maior resistência, maior plasticidade, menor fluidez, etc. (PINHEIRO *et al*., 2004)

Dentre as características relevantes do concreto, as suas propriedades mecânicas são fundamentais para verificar se este está dentro das especificações solicitadas para um determinado tipo de aplicação. Estas características são determinadas por ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. (PINHEIRO *et al*., 2004)

Na compressão do concreto, com o confinamento lateral por algum tipo de elemento (forma de cintamento, perfil metálico tubular, etc.) sua resistência é maior se comparado a uma compressão simples. (PINHEIRO *et al*., 2004)

O concreto em estado de confinamento apresenta algumas características que auxiliam no ganho de resistência e na ductilidade do elemento estrutural.

O efeito do confinamento ocorre a partir do momento em que é aplicada uma força axial elevada sobre o perfil, levando o concreto ao processo de micro fissuração em função das tensões tangenciais desenvolvidas. Com o processo de micro fissuração, ocorre a expansão lateral do concreto, acentuando o contato com o perfil metálico, gerando o confinamento total. (OLIVEIRA et al., 2009)

Segundo PINHEIRO *et al*., 2004, além do efeito de confinamento algumas características do concreto também são importantes para o contexto deste trabalho:

- Retração: que tem como característica a redução do volume do concreto devido a ações de retração química, capilar e por carbonatação.
- Fluência: deformação diferida do concreto, causada por uma força aplicada no elemento, gerando um acréscimo de deformação ao longo do tempo, com a manutenção da carga atuante sobre o elemento.
- Coeficiente de Poisson: que expressa à relação entre a deformação longitudinal e transversal, indicada pela letra ν.

O módulo de elasticidade dos materiais é definido pela relação entre a tensão e a deformação do elemento. A partir do gráfico tensão x deformação, o material pode ser considerado elástico ou inelástico: no caso do regime ser inelástico, após o carregamento sobre o elemento, a deformação permanece mesmo com o alivio de tensão. Já no caso do regime ser elástico, após o alívio de tensão exercida sobre ele, a deformação retorna à geometria inicial, conforme demonstrado na Figura 2-2 e Figura 2-3. (BATTAGIN, 2007)

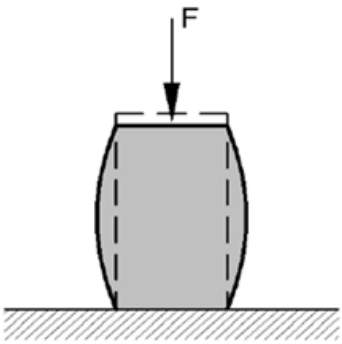

Figura 2-2 - Deformações longitudinais e transversais do elemento devido à aplicação de uma carga concentrada.

Fonte: PINHEIRO et al., 2004.

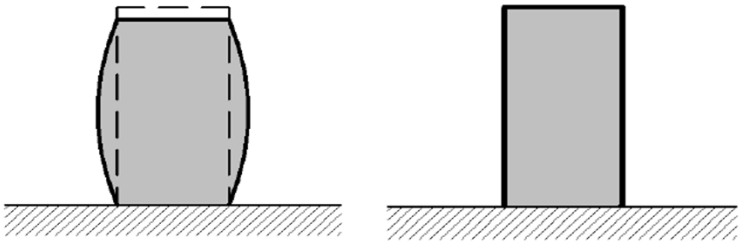

Figura 2-3 - Elemento Inelástico e elástico após o carregamento.

Fonte: PINHEIRO et al., 2004

Na resistência dos materiais, em determinados intervalos, a relação tensão x deformação do elemento é considerada linear e expressa pela Lei de Hooke, conforme a Figura 2-4.

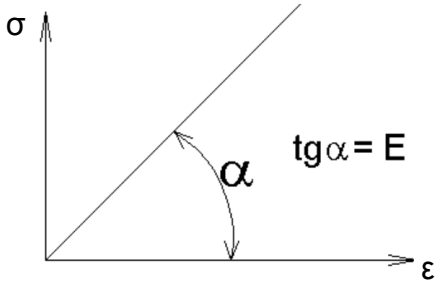

Figura 2-4 - Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal.

Fonte: PINHEIRO et al., 2004

Quanto ao módulo de elasticidade do concreto, a sua análise é aplicada somente na parte retilínea da curva tensão-deformação. Caso não haja a curva retilínea, é definida uma tangente da curva de origem, deste modo, obtendo o

módulo de deformação tangente inicial (Eci), conforme demonstrado na Figura 2-5. (PINHEIRO *et al*., 2004)

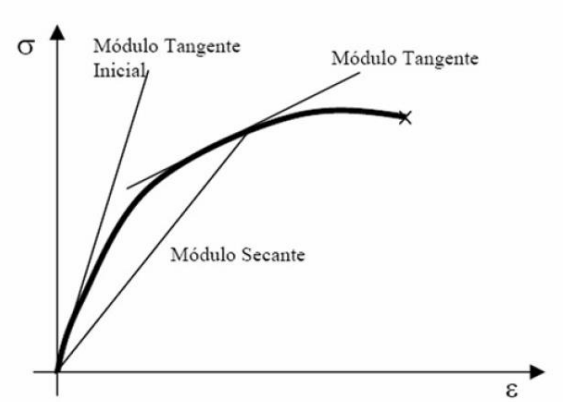

Figura 2-5 - Diagrama do módulo de elasticidade do concreto.

Fonte: BATTAGIN, 2007.

ε = Deformação do concreto.

fc = Resistência do concreto.

Eci = Módulo de deformação tangente inicial.

Ecs = Módulo secante

Outra forma de definir o módulo de elasticidade do concreto quando não houver dados suficientes e precisos para a idade de 28 dias (tempo estimado para que o concreto atinja sua resistência máxima) é pela equação do módulo de deformação tangente inicial, expressa pela equação (2-2):

$$Eci = 5600 * fck^{(1/2)} \ (MPa) \qquad (2\text{-}2)$$

Para aplicação nas analises elásticas de projeto, visando a determinação de esforços internos solicitantes e verificação de limites de serviço, é utilizado o módulo de elasticidade secante, expresso pela equação (2-3):

$$Ecs = 0{,}85 * Eci \ (MPa) \qquad (2\text{-}3)$$

2.2.1 Dosagem do concreto.

O concreto é considerado um material com boa resistência à compressão, porém a sua resistência à tração é muito baixa. Um dos fatores de grande importância que influenciam a resistência do concreto é o fator água/cimento (a/c). (HELENE et al, 1993).

Segundo a Lei de Abrams, quanto menor fator a/c no preparo do concreto, maior a resistência obtida. Esta relação é determinada após o concreto atingir a idade de 28 dias, após este período o aumento da resistência deste não é tão expressivo. A Figura 2-6 demonstra a relação entre o fator água/cimento e a resistência do concreto.

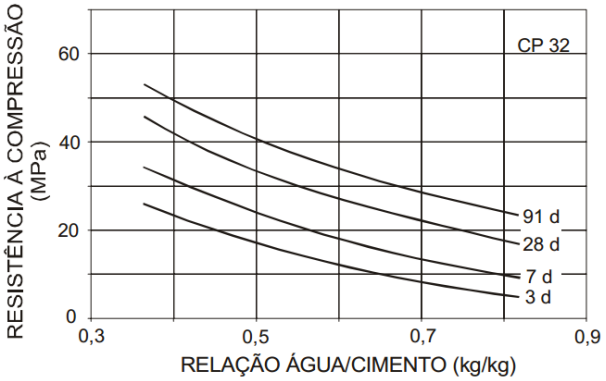

Figura 2-6 - Gráfico da curva de Adams

Fonte: HELENE et al, 1993

Na dosagem dos materiais para a obtenção do concreto com resistência próxima a 25 MPa, o qual será utilizado no ensaio prático dos tubos preenchidos, o traço utilizado será: 1:2:3:0,67; ou seja, para cada volume de cimento, serão necessários dois volumes iguais de areia e três volumes iguais de brita. O fator água/cimento do traço será de 0,67, desta forma, será inserida na receita do concreto um volume de água equivalente à 67 % do volume do cimento inserido. (HELENE et al, 1993)

2.2.2 Slump test

A determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco do cone, também conhecido como “Slump Test” é realizada para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado "plástico" buscando medir sua consistência. Esta trabalhabilidade deve ser adequada em cada situação de concretagem sendo fundamental para a obtenção de um produto final de qualidade. Segundo ACI 116R-90, a trabalhabilidade é uma propriedade do concreto que foi recém-executado e que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual o material pode ser misturado, lançado, adensado e acabado. Quanto mais “seco” o concreto estiver, menor será o seu "abatimento", devido a sua baixa trabalhabilidade. Quanto mais fluído, maior será a trabalhabilidade e também o valor de seu abatimento. Todo o procedimento desse ensaio é normatizado e está descrito na NBR NM 67/1998.



Figura 2-7 - Slump test

Fonte: INTERNET (http://www.sulbrasilconcreto.com.br/slump-test.html)

2.3 Barra comprimida mista Aço-Concreto

A associação dos elementos aço e concreto é utilizada em diferentes concepções estruturais ao longo dos séculos na construção civil, mostrando ser a solução mais viável tecnicamente e economicamente para diferentes tipos de projetos, dada a facilidade de obtenção destes materiais no mercado. (SILVA, 2006)

Comumente, a associação entre os elementos aço e concreto é utilizada nas estruturas de concreto armado, porém, há alguns anos, tem se presenciado uma nova concepção entre a relação destes materiais que são as estruturas mistas (perfil tubular metálico preenchido com concreto). Estas diferenciam-se do concreto armado pela utilização do aço estrutural como o material principal. (SILVA, 2006)

A combinação dos materiais aço e concreto em pilares mistos pode propiciar algumas vantagens. Além da melhoria de resistência ao fogo e do aumento da resistência mecânica do elemento, essa combinação contribui para um aumento na rigidez da estrutura aos carregamentos horizontais devido ao vento e às solicitações decorrentes de sismos. A ductilidade é outro ponto que diferencia os pilares mistos, os quais apresentam um comportamento mais “dúctil” quando comparados com os pilares de concreto armado isolados. (ALVA *et al.,* 2005)

Na utilização de perfis tubulares preenchidos com concreto, temos a vantagem de não utilizar fôrmas para a concretagem, e o perfil não sofre nenhum dano relativo às ações da fase construtiva enquanto o concreto atinge a sua resistência final. (DE NARDIN et al., 2008)

As características citadas são responsáveis pela crescente utilização de sistemas tubulares preenchidos com concreto em diversos projetos distintos, criando várias propriedades que beneficiam a sua utilização, como verificado no Quadro 2-1.

Quadro 2-1 - Principais características dos pilares preenchidos com concreto

Em Relação ao concreto armado	Em relação ao aço
- Dispensa fôrmas e escoramentos;	- Aumento da resistência ao fogo e corrosão;
- Aumento da precisão dimensional;	- Melhoria geral do desempenho estrutural do elemento e da estrutura como um todo.
- Maior industrialização da construção com consequente redução de custo de mão-de-obra.	

Fonte: Adaptado de SILVA, 2006

Para a definição de qual seção tubular utilizar (circular, quadrada, retangular), leva-se em consideração o efeito de confinamento do concreto.

Segundo ALVA *et al., (*2005), o efeito de confinamento do concreto nos elementos mistos é um assunto ainda pouco estudado, devido à dificuldade de realizar investigações no comportamento apenas do concreto, e consequentemente o comportamento deste nos diferentes tipos de seções tubulares.

O confinamento do concreto ocorre quando, a partir de um carregamento axial no pilar, a expansão lateral do núcleo do concreto submetido a um esforço triaxial de tensões é maior que o perfil de aço, gerando pressões radiais na interface aço-concreto. (ALVA *et al.,* 2005)

Este fenômeno ocorre após as primeiras etapas de carregamento, onde a micro fissuração do concreto se intensifica e o confinamento atinge o seu valor máximo, gerando um esforço maior no perfil de aço. (DE NARDIN *et al.,* 2008)

Devido às pressões radiais combinadas com a compressão atuante sobre o perfil, ocorre uma diminuição da resistência de escoamento do perfil de aço de acordo com o critério de ruptura de Von Mises, e um acréscimo de resistência à compressão do concreto confinado. (ALVA *et al.,* 2005)

Como resultado destes efeitos, ao invés de uma soma algébrica da resistência dos materiais aço-concreto, há um ganho na capacidade de resistência do elemento misto, se comparado a um perfil metálico similar sem a presença do confinamento do concreto. (ALVA *et al.,* 2005)

Nos pilares quadrados e retangulares preenchidos com concreto (Figura 2-8a), o confinamento ocorre apenas na região mais central e nos cantos da seção quadrada do perfil, enquanto que os pilares de seção circular (Figura 2-8b) apresentam um grau de confinamento maior, gerando um acréscimo da capacidade resistente devido a esta geometria. (DE NARDIN *et al.,* 2008)

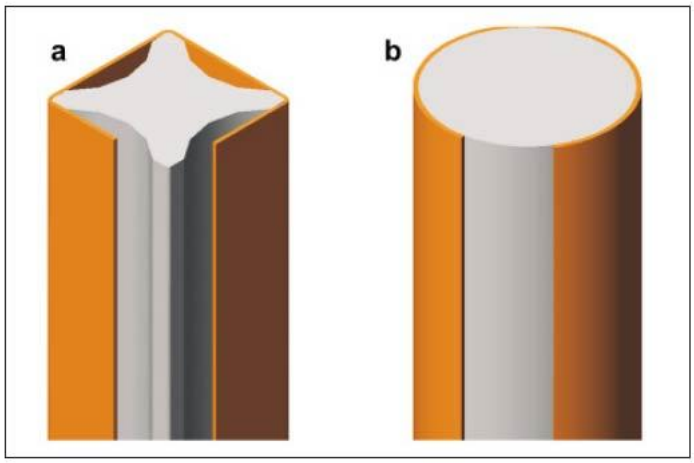

Figura 2-8 - Confinamento do concreto em perfis de aço.

Fonte: DE NARDIN et al., 2008

Segundo ALVA *et al.,* 2005, essa associação de materiais será considerada um elemento misto, somente após o endurecimento do concreto, onde os dois elementos passam a trabalhar de maneira conjunta.

A aderência dos materiais aço e concreto é simplesmente estabelecida pelas ações de adesão e atrito, onde o concreto, mais rugoso e confinado em contato com o perfil de aço, gera uma perfeita ação conjunta entre os dois materiais garantindo uma interação completa. (ALVA *et al.,* 2005)

2.4 Normatização das estruturas tubulares de aço

As pesquisas realizadas sobre tubos de aço estão se tornando cada vez mais comuns em todo o país, indicando o crescimento da demanda por soluções tubulares nas estruturas da construção civil. Com este aumento significativo,

também destaca-se a necessidade de novos métodos de cálculo para estas estruturas. (KRIPKA *et al.,* 2008)

As normas existentes, por serem obtidas através de estudos experimentais, variam muito de um país a outro. Algumas normas consideram que o pilar misto de aço com o preenchimento de concreto tem sua resistência aumentada devido ao núcleo de concreto nele presente, podendo assim, reduzir a seção metálica do elemento. (DE NARDIN, 1999)

A norma americana American Concrete Institute, (ACI), 318/2005 considera que o pilar tubular metálico preenchido com concreto tem as mesmas características de um pilar de concreto armado. (DE NARDIN et al, 2008)

Segundo DE NARDIN *et al,* 2008, a norma europeia (EUROCODE 4/2004) envolve o raciocínio de que o pilar misto com o preenchimento de concreto tem o comportamento similar ao pilar de concreto armado, porém com um ganho de resistência.

A NBR8800/2008, que orienta projetos de estruturas mistas de aço e concreto de edificações, apenas faz esclarecimentos e referências secundárias quanto à utilização de perfis tubulares e o seu preenchimento com concreto.

A NBR8261 de 1983 e revisada no ano de 2010, que aborda os diferentes tipos de perfis tubulares de aço carbono formados a frio, foca-se nos critérios de fabricação e nas nomenclaturas dos tubos, padronizando a comercialização e o uso do material conforme as especificações de projeto.

Há uma comissão de estudos para a elaboração de uma norma nacional específica de tubos de aço, a minuta ABNT/CB-02, que visa os projetos de estruturas tubulares de aço e estruturas tubulares mistas de aço com o preenchimento de concreto para edificações.

Levando em consideração as referências citadas, torna-se difícil o desenvolvimento de novos métodos de cálculo de perfil tubular preenchido, por não haver uma norma técnica regulamentadora para este tipo de análise no país.

Por estes motivos citados, para a verificação do perfil metálico do nosso trabalho, será utilizada a norma brasileira para estruturas metálicas NBR 8800/2008, no item de elementos comprimidos.

Dentre os esclarecimentos apresentados pelo método simplificado da NBR 8800/2008 para dimensionamento do perfil de aço tubular com o preenchimento de concreto, são descritas como hipóteses básicas as seguintes informações:

- o concreto deve possuir densidade normal (entre 2300 a 2500kg/m³);
- os pilares com seções transversais preenchidas com concreto devem possuir perfil de aço tubular, retangular ou circular;
- há interação completa entre o concreto e o aço;
- seções transversais preenchidas com concreto podem ser fabricadas sem qualquer armadura interna;

Dentre as hipóteses básicas para o dimensionamento do perfil tubular metálico com o preenchimento de concreto, a NBR 8800/2008 traz em sua sequência de cálculo um coeficiente (α=0,95) que minora o valor da resistência do concreto, ou seja, sendo conservadora com relação à resistência do pilar misto, admitindo menor resistência do elemento. Já a Eurocode 4/2004 não utiliza nenhum coeficiente de minoração, pois considera que a interação entre o aço e o concreto confinado gera um ganho de resistência a compressão, tornando-se assim mais arrojada que a norma brasileira. (DE NARDIN et al, 2008)

2.5 Aderência entre os materiais aço-concreto

Para o melhor entendimento da aderência entre o aço e o concreto vamos comparar, em termos de aderência, o comportamento de um pilar convencional de concreto armado com um perfil tubular metálico preenchido com concreto.

Nas estruturas de concreto armado, a aderência entre a armadura e o concreto deve ser total, pois esta é responsável pela transferência das tensões em todo o elemento estrutural e também pela compatibilidade das deformações entre os materiais. Por este motivo, o concreto armado é tratado como elemento estrutural a partir da cura do concreto, onde ocorre a interação dos materiais devido à adesão e atrito entre os elementos (SILVA, 2006).

> *Segundo SILVA, 2006 apud LEONHARDT & MÖNNIG, (1977). "A aderência em peças de concreto armado surge sempre que houver variação de tensões em determinado trecho de barras de aço. As principais causas dessas variações de tensões são: ações externas, fissuras, forças de ancoragem nas extremidades das barras, variações de temperatura, retração do concreto e deformação lenta." (SILVA, 2006).*

No caso do tubo preenchido com concreto, a aderência entre os materiais ocorre na interface dos elementos, esta aderência é determinada através da análise da relação entre tensão x escorregamento. (SILVA, 2006)

Devido à geometria dos perfis metálicos, o escorregamento entre o perfil de aço e o concreto é analisado por três mecanismos de transferência distintos: a adesão entre os materiais, à aderência mecânica e o atrito. Os mecanismos de aderência e atrito no elemento são relacionados pelas características e propriedades mecânicas da interface do aço e concreto. A adesão em relação aos outros mecanismos é considerada quase desprezível, já que atua apenas no momento em que o elemento misto não sofre nenhum tipo de carregamento. (SILVA, 2006)

O atrito entre o perfil tubular metálico e o concreto é responsável por restringir o movimento normal entre os elementos, quanto maior a rugosidade da área interna do aço que reveste o concreto, maior o atrito entre eles. O atrito começa a atuar a partir do momento em que é aplicado o carregamento sobre o elemento misto.

Da mesma forma que o atrito, a aderência entre os materiais também é percebida a partir do momento em que o elemento misto sofre o carregamento de compressão. Este fenômeno permite que haja a compatibilização entre os dois materiais.

O fenômeno da aderência é talvez o mecanismo mais indicado para o entendimento do funcionamento do contato entre os materiais. Dada uma força aplicada sobre o perfil tubular de aço preenchido com concreto, há uma tendência de ocorrer entre os materiais um deslocamento através do escorregamento. Porém, devido ao confinamento do concreto a separação entre os materiais é impedida, e surgem consequentemente tensões radiais ao elemento que resistem ao escorregamento esperado (SILVA, 2006).

2.6 Estado geral de tensões

Considere o tetraedro mostrado na Figura 2-9.

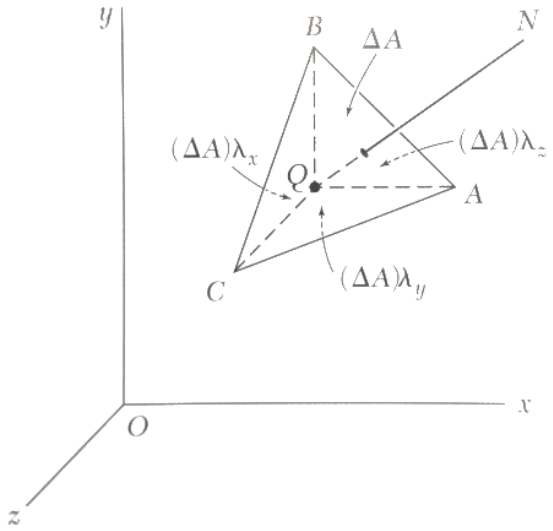

Figura 2-9 - Identificação das áreas do tetraedro

Fonte: BEER, 2011

Segundo BEER *et al*., 2011, três de suas faces são paralelas aos planos coordenados, enquanto a quarta face, ABC, é perpendicular à linha QN. Chamando de ΔA a área da face ABC, e de λ_x, λ_y e λ_z os cossenos diretores da linha QN, determinamos os valores das áreas das faces perpendiculares aos eixos *x, y* e *z*, que são, respectivamente, $(\Delta A)\,\lambda_x$, $(\Delta A)\,\lambda_y$ e $(\Delta A)\,\lambda_z$. Se o estado de tensão no ponto Q definido pelas componentes de tensão σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz} e τ_{zx}, então as forças que atuam nas faces paralelas aos planos coordenados podem ser obtidas multiplicando-se as componentes de tensão apropriadas pela área de cada face, como mostrado na Figura 2-10.

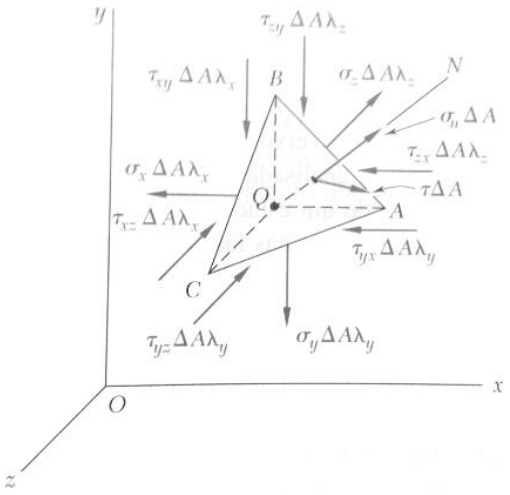

Figura 2-10 - Forças e Tensões atuantes no tetraedro

Fonte: BEER, 2011

Entretanto, as forças que atuam na face ABC consistem em uma força normal de intensidade $\sigma_n\ \Delta A$ direcionada ao longo de QN, e de uma força de cisalhamento de intensidade $\tau\ \Delta A$ perpendicular a QN, mas de direção desconhecida. Como as faces QBC, QCA e QAB, respectivamente, estão voltadas para o sentido contrário ao dos eixos x, y e z, as forças que atuam nelas devem ser mostradas com sentidos negativos.

Considerando que a soma das componentes ao longo de QN de todas as forças que atuam no tetraedro é zero. Observando que a componente ao longo de QN de uma força paralela ao eixo x é obtida multiplicando-se a intensidade daquela força pelo cosseno diretor λ_x, e que as componentes das forças paralelas aos eixos y e z são obtidas de uma maneira análoga, escrevemos:

$$\sum \mathrm{F_n} = 0:$$
$$\sigma_n\Delta A-(\sigma_x\Delta A\lambda_x)\lambda_x-(\tau_{xy}\Delta A\lambda_x)\lambda_y-(\tau_{xz}\Delta A\lambda_x)\lambda_z-(\tau_{yx}\Delta A\lambda_y)\lambda_x-(\sigma_y\Delta A\lambda_y)\lambda_y$$
$$-(\tau_{yz}\Delta A\lambda_y)\lambda_z-(\tau_{xz}\Delta A\lambda_z)\lambda_x-(\tau_{zx}\Delta A\lambda_z)\lambda_y-(\sigma_z\Delta A\lambda_z)\lambda_z=0 \qquad (2\text{-}4)$$

Dividindo a equação 2.3 por ΔA e isolando para σ_n, temos:

$$\sigma_n=\sigma_x\lambda_x^2+\sigma_y\lambda_y^2+\sigma_z\lambda_z^2+2\tau_{xy}\lambda_x\lambda_y+2\tau_{xy}\lambda_y\lambda_z+2\tau_{zx}\lambda_z\lambda_x \qquad (2\text{-}5)$$

A expressão obtida para a tensão normal σ_n é uma forma quadrática em λ_x, λ_y e λ_z. Conclui-se que podemos selecionar os eixos de coordenadas de uma

maneira tal que o membro direito da equação 2.4 se reduza aos três termos que contêm os quadrados dos cossenos diretores. Chamando esses eixos de a, b e c, as tensões normais correspondentes de σ_a, σ_b e σ_c, e os cossenos diretores de QN com relação a esses eixos de λ_a, λ_b e λ_c, escrevemos:

$$\sigma_n = \sigma_a \lambda_a^2 + \sigma_b \lambda_b^2 + \sigma_c \lambda_c^2 \qquad (2\text{-}6)$$

Os eixos de coordenadas a, b, c são chamados de eixos principais de tensão. Como sua orientação depende do estado de tensão em Q e, portanto, da posição de Q, eles foram representados na Figura 2-11 ligados a Q. Os planos coordenados correspondentes são conhecidos como planos principais de tensão, e as tensões normais correspondentes a σ_a, σ_b e σ_c como tensões principais em Q.

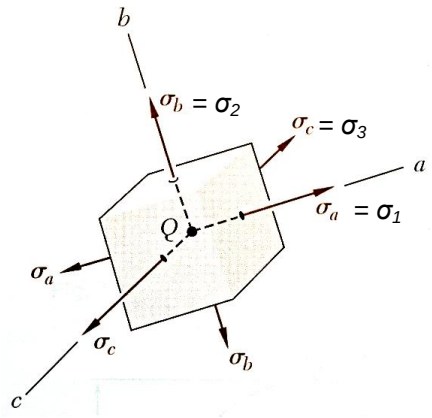

Figura 2-11 - Representação dos eixos e tensões principais

Fonte: BEER, 2011

2.6.1 Tensões principais.

As direções principais das tensões são obtidas através de uma reorientação do elemento de volume, de forma que as tensões de corte atuantes em cada uma das suas faces sejam nulas, consequentemente, a tensão normal e o vetor de tensão sejam coincidentes.

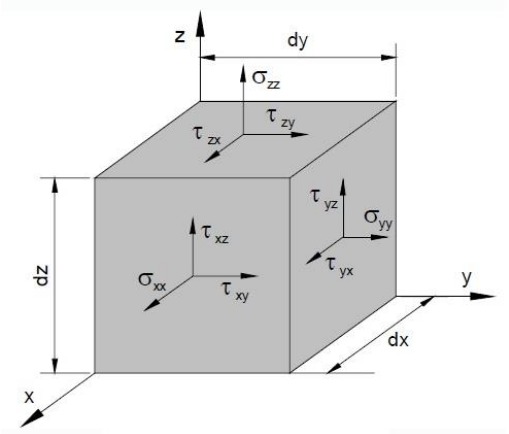

Figura 2-12 – Tensões quaisquer de um elemento

Fonte: Instituto Superior Técnico

A equação (2-7) representa o tensor de tensões.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}7)$$

Onde:

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ = Tensões nos eixos x, y e z respectivamente.

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zz}$ = tensões de cisalhamento.

O vetor e os valores próprios do tensor das tensões são obtidos através das equações abaixo.

$$\left|\sigma_{ij} - \lambda\delta_{ij}\right| = 0 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \lambda & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - \lambda & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (2\text{-}8)$$

$$\lambda^3 - I_1\lambda^2 - I_2\lambda - I_3 = 0 \quad (2\text{-}9)$$

Onde:

As três raízes da equação λ_I são os valores das tensões principais $(\sigma_1, \sigma_2 e \sigma_3)$.

Através destas formulações, encontramos o estado de tensões principais dos elementos.

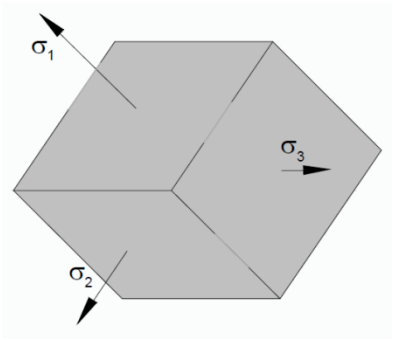

Figura 2-13 - Tensões principais

Fonte: Instituto Superior Técnico

Logo, através da formulação (2-8)(2-10), obtemos a seguinte equação:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2\text{-}10)$$

Logo:

$\sigma_1, \sigma_2 e \sigma_3$ = Tensões principais

2.6.2 Invariantes dos tensores das tensões.

Os invariantes são as propriedades características dos tensores que nos permitem identificar a igualdade dos tensores. É habitual definir os invariantes do tensor das tensões “I” e os invariantes do tensor desviador das tensões “J”.

Desta forma, a formulação dos invariantes é determinada através das equações (2-7) e (2-9).

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{2-11}$$

$$I_2 = -\frac{1}{2}\left(\sigma_{ii}\sigma_{jj} - \sigma_{ij}\sigma_{ij}\right) = -\left(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z\right) + \tau^2_{xy} + \tau^2_{yz} + \tau^2_{zx} \tag{2-12}$$

$$I_2 = -\left(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1\right)$$

$$I_3 = \left|\sigma_{ij}\right| = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau^2_{yz} - \sigma_y\tau^2_{zx} - \sigma_z\tau^2_{xy} = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \tag{2-13}$$

Os invariantes do tensor desviador das tensões são as seguintes quantidades:

$$J_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \tag{2-14}$$

$$J_2 = \left(\sigma'_1\,\sigma'_2 + \sigma'_2\,\sigma'_3 + \sigma'_3\,\sigma'_1\right) \tag{2-15}$$

$$J_3 = \sigma'_1\,\sigma'_2\,\sigma'_3 \tag{2-16}$$

2.7 Critérios de falha

Normalmente os projetos estruturais são desenvolvidos de maneira que as tensões de serviço de uma determinada peça ou componente não superem a tensão admissível do material do qual ele é fabricado. (MASUERO et al., 2008)

Adota-se a tensão admissível como uma parcela da tensão limite do material, dada pela equação (2-17):

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{\lim}}{S} \tag{2-17}$$

Onde "S" é um escalar chamado de coeficiente de segurança, geralmente fornecido pelas normas.

Em certos casos, o material está submetido a um estado de tensão multiaxial, com vários componentes de tensão, como por exemplo σ_x ,σ_y ,τ_{xy} etc., é

preciso determinar uma tensão equivalente σ_{eq}. Esta, por definição, é a tensão que, aplicada na forma de tração / compressão simples, produz uma solicitação mecânica equivalente ao do carregamento complexo. (MASUERO et al., 2008)

Para a determinação da tensão equivalente existem várias propostas de fórmulas que, em geral, são colocadas em função das tensões principais.

Algumas das teorias existentes para obtenção da tensão equivalente são:

- Teoria de Rankine
- Teoria de Guest
- Teoria de Saint Venant
- Teoria de Coulomb
- Teoria de Von Mises
- Teoria de Drucker Prager
- Teoria de Willam-Warnke

Para a análise do tema deste trabalho serão adotados os critérios de Von Mises para o aço e de Willam-Warnke para o concreto. O critério de Von Mises foi escolhido pelo fato de ser largamente utilizado para materiais dúcteis (aço), enquanto o critério de Willam-Warnke para materiais frágeis (concreto).

2.7.1 Teoria de Von Mises

Segundo POPOV, 1978, a teoria de Von Mises, também chamada de teoria da máxima energia de distorção, tem uma larga aceitação para materiais dúcteis, isotrópicos, e é baseada em conceitos de energia. A energia total elástica é dividida em duas partes: uma é associada com as mudanças volumétricas do material e a outra associada as distorções de cisalhamento. O critério de Von Mises é baseado na determinação da energia de distorção de um material, ou seja, na energia associada com as mudanças de forma do material, em contraposição à energia associada às mudanças de volume do mesmo. Segundo este critério, um dado material estrutural está seguro enquanto o valor da máxima distorção de energia por

unidade de volume permanecer menor do que a energia de distorção por unidade de volume necessária para que se cause o escoamento.

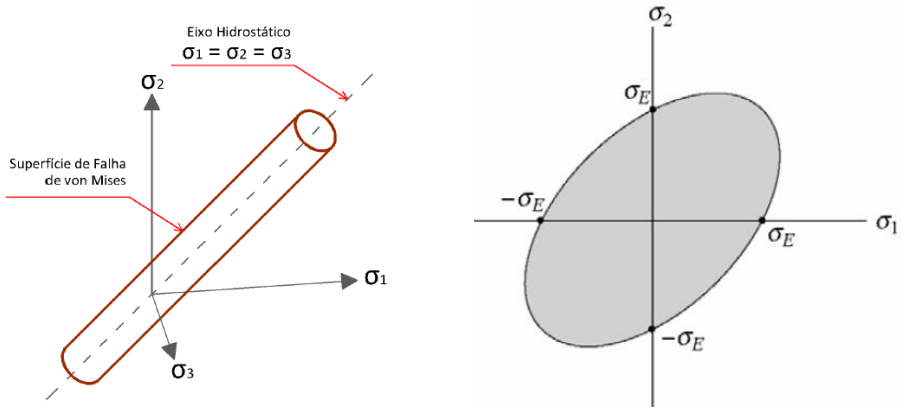

Figura 2-14 - Teoria de Von Mises

Fonte: CHEN W. F., 2007

Matematicamente a função de escoamento para o critério de Von Mises é expressa como:

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - \sigma_{ys} = 0 \quad \text{ou} \tag{2-18}$$

$$f(J_2) = J_2 - \sigma^2{}_{ys} = 0 \tag{2-19}$$

Onde:

σ_{ys} é a tensão de escoamento do aço.

2.7.2 Teoria de Willam-Warnke

Segundo CHEN, W.F. (2007) Willam e Warnke (1975) propuseram uma superfície de falha baseada em três parâmetros para o concreto em regime de tração e baixa compressão. Este modelo possui meridianos retos e seções transversais não circulares ao longo do eixo hidrostático, cuja aproximação elíptica se faz da maneira a seguir.

Considere-se um plano desviador típico da superfície de falha como demonstrado pela Figura 2-15.

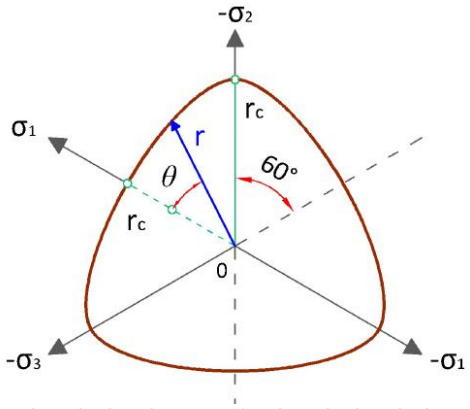

Figura 2-15 - Plano desviador (ou seção desviadora) da superfície de falha.

Fonte: CHEN. W. F., 2007

Willam e Warnke propuseram uma expressão elíptica para a forma da seção transversal desta superfície de falha que é convexa e suave. A forma elíptica é considerada a mais adequada dado que ela pode compreender não somente as condições de simetria, suavidade e concavidade, mas também, ela se degenera em um circulo caso $r_c = r_t$, onde r_c e r_t são os raios nos meridianos 1 e 2. Isto significa que o cilindro do modelo de Von Mises acaba sendo um caso particular desta formulação. Como mencionado antes, ele e um critério baseado em três parâmetros sendo estes:

f_c - resistência do concreto a compressão

f_t - resistência do concreto a tração

f_b - resistência do concreto a compressão equibiaxial

A função da superfície de falha de Willam-Warnke é definida como:

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{I_1}{3\rho_f f_c} + \frac{\sqrt{2J_2}}{\sqrt{5} * r(\theta) f_c} - 1 = 0 \tag{2-21}$$

ou ainda:

$$f(\sigma_m, \tau_m, \theta) = \frac{\tau_m}{\rho_f f_c} + \frac{\tau_m}{r(\theta) f_c} - 1 = 0 \tag{2-22}$$

Onde ρ_f equivale a:

$$\rho_f = \frac{\tilde{f}_b \tilde{f}_t}{\tilde{f}_b - \tilde{f}_t} \tag{2-23}$$

2.8 Modelagem computacional

2.8.1 Método dos Elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta que permite a análise de aplicações da engenharia estrutural, ou seja, analisar o comportamento de qualquer sistema físico de geometrias complexas, permitindo a análise de diferentes tipos de materiais, com propriedades variáveis e representação de condições de contorno que melhor reproduzem o problema a ser solucionado. (SORIANO, 2009)

Em problemas mecânicos em geral, as variáveis são os deslocamentos, tensões, pressões, temperaturas, etc. onde estão associados a cada ponto do elemento ou região de solução. A discretização por elementos finitos representado na Figura 2-16, reduz o problema constituído por um número infinito de pontos no meio contínuo por um número finito de incógnitas, através da divisão do domínio em elementos, e expressando as variáveis de campo em termos de funções de aproximação de cada elemento. As funções de aproximação, também conhecidas como função de interpolação, são definidas através dos nós ou pontos nodais, onde estes fazem a ligação entre os elementos. (KRÜGER, 2007)

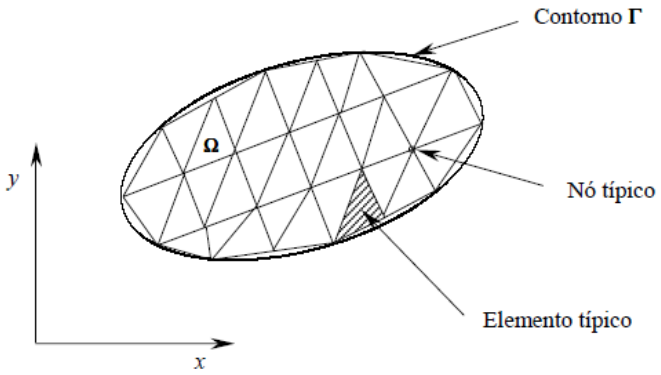

Figura 2-16 - Representação da discretização por elementos finitos.

Fonte: KRÜGER, 2007.

Os elementos podem ser lineares onde possuem nós somente nos vértices dos elementos, quadráticos onde possuem nós entre os vértices e admitem variações quadráticas e de ordem superior, onde serão considerados desde ordem quadrática até de ordem superior. (KRÜGER, 2007)

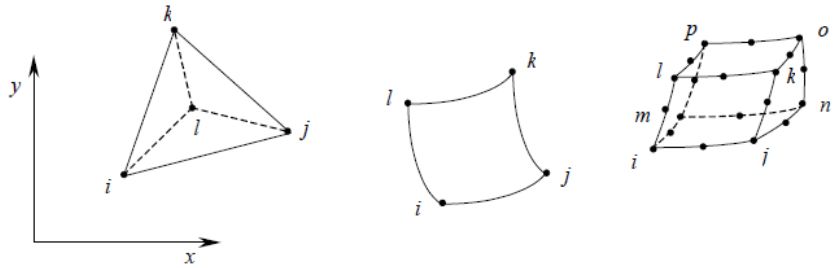

Figura 2-17 - Exemplos de elementos tridimensionais.

Fonte: KRÜGER, 2007.

A solução aproximada é gerada através da construção da malha, que pode ser simplificada, com número pequeno de elementos, ou refinada, com um numero maior de elementos, gerando um resultado mais confiável, conforme imagem do elemento computacional. Na modelagem mais detalhada, o modelo exige um poder maior de processamento do sistema, pois este processo aumenta o número de equações de equilíbrio. (SORIANO, 2009)

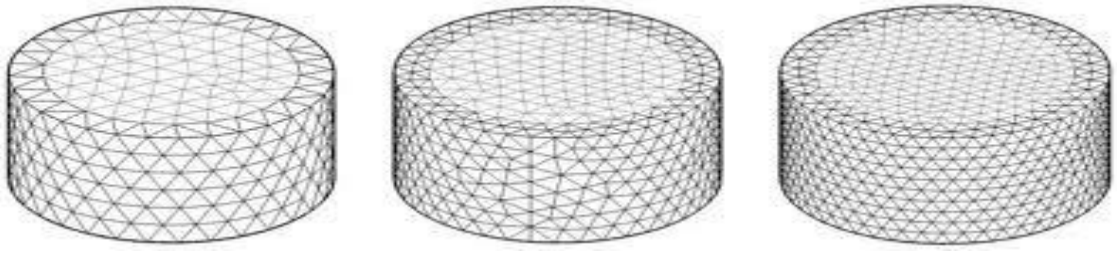

Figura 2-18 - Exemplos de malhas de elementos finitos.

Fonte: INTERNET – (http://engeletrica-mef.blogspot.com.br/2010/09/dissertacao-diego-pereira-botelho.html)

2.8.1.1 Funções de interpolação.

A escolha das funções de interpolação é parte indispensável na modelagem e análise por elementos finitos, pois a seleção adequada das funções de forma juntamente com o tipo do elemento, implica diretamente nos resultados da modelagem atingindo uma aproximação satisfatória. (TEIXEIRA, 2006)

A partir do uso das funções de interpolação e de forma é obtida a relação entre os deslocamentos do elemento em qualquer ponto e os deslocamentos nodais deste. (BATHE, 1996)

As funções de interpolação descrevem a forma como as variáveis de campo podem ser aproximadas a partir dos valores nodais do elemento. As funções polinomiais de interpolação são bastante utilizadas devido a sua fácil integração e diferenciação. (BATHE, 1996)

2.8.1.2 Determinação das propriedades dos elementos.

A escolha da malha de elementos finitos é definida através das equações que expressam as propriedades dos elementos através de uma matriz característica. Em análise de tensões, como descrito no presente trabalho, esta define a matriz

rigidez e as cargas nodais que estão associadas ao estado de deformação dos elementos.

Desta forma, problemas estruturais estáticos podem ser solucionados através de equações, como a descrita abaixo:

$$\{f\}^e = [k_R]^e \{d\}^e \tag{2-24}$$

Onde:

$\{f\}^e$ = Vetor dos carregamentos nodais.

$[k_R]^e$ = Matriz de rigidez dos elementos.

$\{d\}^e$ = Vetor dos graus de liberdade nodais.

que representa a condição de equilíbrio de um único elemento finito.

Para a determinação das propriedades do sistema como um todo devem ser combinadas e agrupadas as propriedades de cada elemento. Neste sentido, espalham-se as matrizes dos elementos na matriz global que expressa o comportamento de todo o sistema. As equações matriciais globais possuem a mesma forma das equações dos elementos individuais, contendo, entretanto, maior número de termos porque incluem todos os nós e graus de liberdade definidos do meio contínuo discretizado. (BATHE, 1996)

A base desta combinação reside no fato de que em um nó onde há conexão entre elementos, o valor da variável de campo é o mesmo para cada elemento conectado. A matriz característica completa deve ser uma matriz quadrada n x n, sendo n o número de graus de liberdade do sistema. Os coeficientes resultantes devem ser obtidos pela soma direta dos coeficientes dos elementos individuais. (BATHE, 1996)

Assim, o equacionamento para análises estruturais pode ser representado conforme as equações a seguir.

$$\{f\} = [k_R]\{d\} \tag{2-25}$$

$$[k_R] = \sum_{e=1}^{n} [k]^e \tag{2-26}$$

$$\{F\} = \sum_{e=1}^{n} \{f\}^e \tag{2-27}$$

Onde:

n = Número de elementos do sistema.

$[k_R]$= Matriz de rigidez do sistema.

$\{d\}$ = Vetor dos graus de liberdade nodais do sistema.

$\{F\}$= Vetor dos carregamentos nodais do sistema.

As equações matriciais definidas para todo o sistema devem ser adaptadas para levar em consideração as condições de contorno que representem o problema físico (BATHE, 1996).

Existem variais teorias para a determinação da matriz de rigidez e modos de obter essas funções aproximadas, dentre elas as mais conhecidas são:

- Método de Rayleigh-Ritz;
- Método de Galerkin;
- Resíduos Ponderados;
- Método direto;
- Método variacional;

2.8.2 Software utilizado para a modelagem computacional.

Para a análise computacional do perfil tubular metálico com o preenchimento de concreto, será utilizado um software de modelagem matemática com base na teoria dos elementos finitos.

O software a ser utilizado para a modelagem do elemento misto será o ANSYS®, pioneiro na aplicação do método dos elementos finitos.

Este programa de computador é dividido em três ferramentas essenciais para a execução da modelagem:

- Preprocessador (*Preprocessor)*, onde são inseridas as características da geometria dos elementos do problema, os tipos de elementos a ser utilizado, a malha a ser empregada, etc.
- Processador (*Solution*), onde são realizados os cálculos para a solução dos sistemas lineares;
- Pós-processador (*Postprocessador),* onde o software faz a apresentação dos resultados.

Este software é utilizado em diversos ramos da engenharia, auxiliando na solução de problemas mecânicos, na análise modal para a determinação de vibrações em estruturas, análise térmica, análise de fluido, análise de problemas acústicos, eletromagnetismo e uma série de outras aplicações. Quanto à aplicação do software neste trabalho, o Ansys Mechanical auxiliará a obter as características do perfil tubular com o preenchimento do concreto, apresentando as seções criticas da análise, onde o carregamento é mais acentuado e o comportamento da interação dos materiais aço-concreto.

2.8.3 Elemento escolhido para modelagem computacional.

O elemento a ser utilizado na modelagem computacional é o SOLID187, que tem como base as seguintes características de entrada, conforme Figura 2-19:

- É um elemento de ordem superior 3-D;
- Elemento definido por 10 nós;
- Cada nó do elemento é constituído por três graus de liberdade, x, y e z.
- O elemento possui as características de plasticidade, hiperelasticidade, deformação, enrijecimento de tensões, capacidade de deformação de grande porte;

- Capacidade de formulação mista entre dois elementos para simular deformação dos materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiperplásticos totalmente incompressíveis;
- As cargas dos materiais são inseridas nos nós das malhas do elemento;
- As pressões podem ser introduzidas como cargas sobre o elemento;
- É possível inserir as temperaturas que atuam sobre o corpo como cargas corporais;

Nos dados de saída, as características do SOLID187 são as seguintes:

- deslocamentos nodais que incluem a solução global nodal;
- as direções de tensões de superfície são paralelas ao sistema de coordenadas do elemento;
- produção de elementos adicionais;

Através destas características, é possível modelar de forma aproximada o perfil tubular com o preenchimento de concreto.

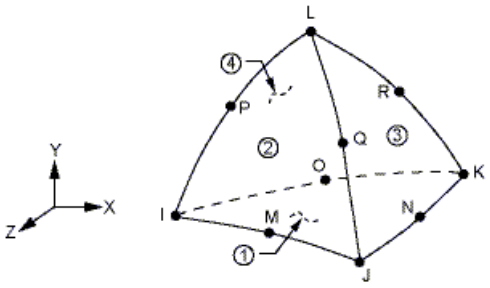

Figura 2-19 - Elemento SOLID187

Fonte: Software ANSYS®.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o propósito de entender a interação aço-concreto, adotou-se a metodologia descrita a seguir:

1. Investigação experimental: visando obter dados do comportamento da interface aço-concreto, bem como da resistência à compressão final do elemento misto. A investigação foi dividida da seguinte forma:
    A. Parte 1 - ensaio de tubos de aço simples, sem o preenchimento com concreto.
    B. Parte 2 - ensaio de corpos de provas de concreto, para obtermos sua resistência.
    C. Parte 3 - ensaio do elemento misto, tubo de aço preenchido com concreto.
2. Modelagem computacional: visando simular o elemento misto, em software baseado em elementos finitos. (ANSYS®)
3. Comparação e análise dos resultados obtidos do ensaio experimental e da modelagem feita no software ANSYS®.

3.1 Modelagem computacional

Para tal modelagem, utilizamos o software ANSYS®. A Figura 3-1 mostra a tela inicial do software citado, no qual foram executados os passos, mostrados a seguir, para execução da simulação de um carregamento (força de compressão) no elemento misto estudado.

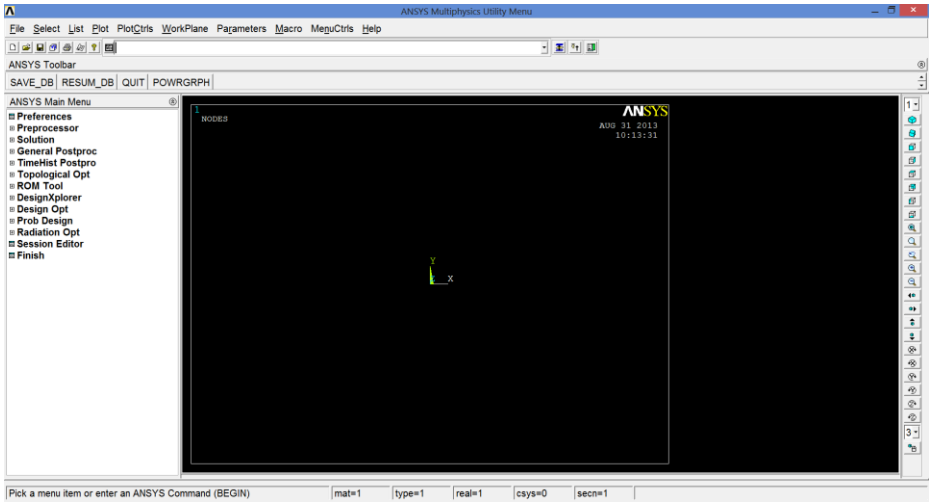

Figura 3-1 - Tela Principal do Software ANSYS

- Na seção Preprocessor:

1- Foi escolhido o tipo de elemento para a modelagem, o Solid 187.

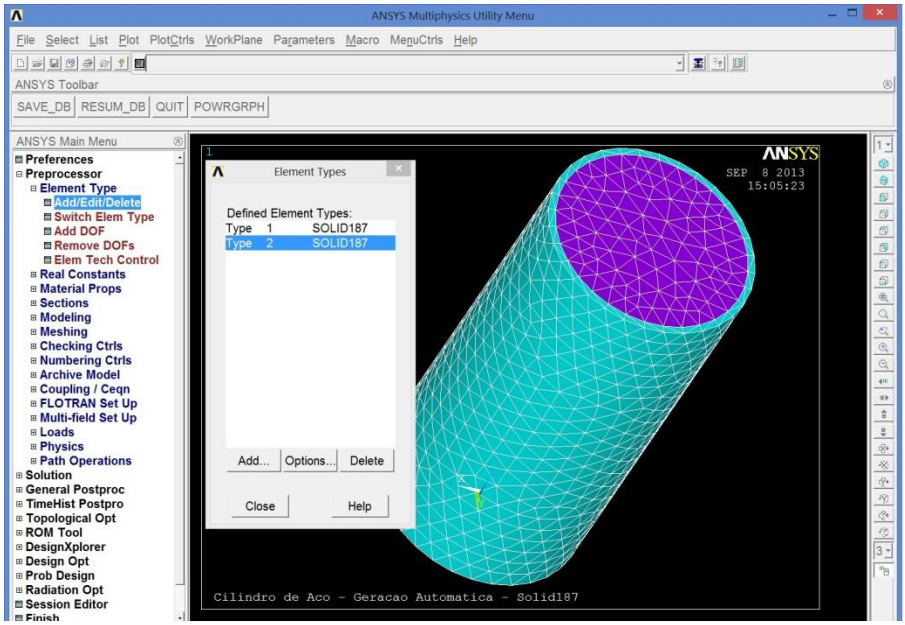

Figura 3-2 - Escolha do tipo de elemento

2- Definidas as características para cada material: a geometria do perfil tubular metálico e do preenchimento de concreto, o modulo de elasticidade dos matérias e a malha a ser utilizada.

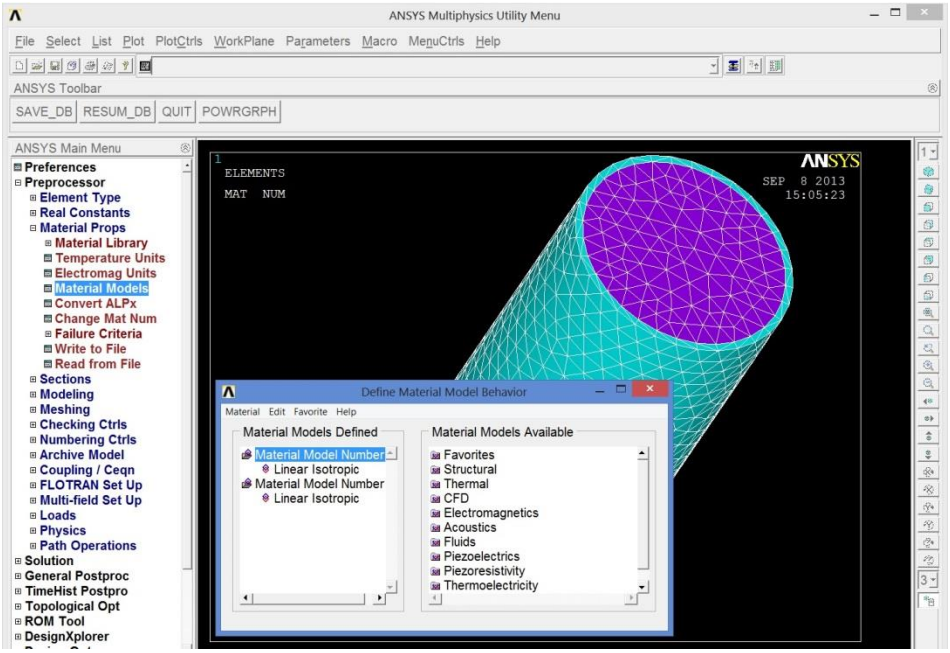

Figura 3-3 - Definição das características dos materiais

3- Modelados o tubo de aço e o preenchimento em concreto em elementos separados, porém no mesmo eixo.

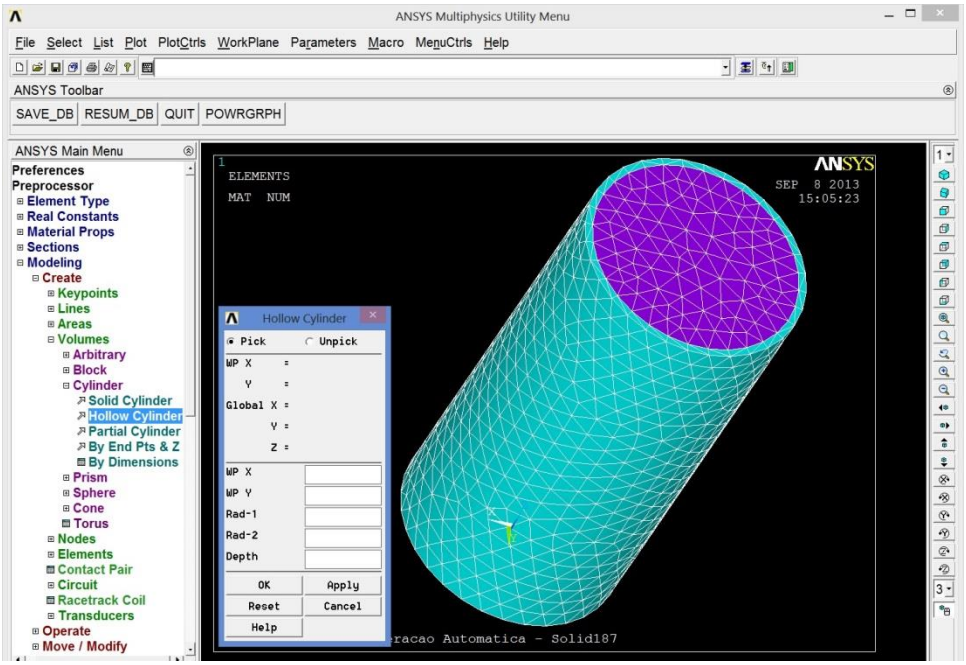

Figura 3-4 - Modelagem do tubo preenchido

4- Utilizada a ferramenta Glue do Ansys, para simular perfeita aderência entre os materiais aço e o concreto.

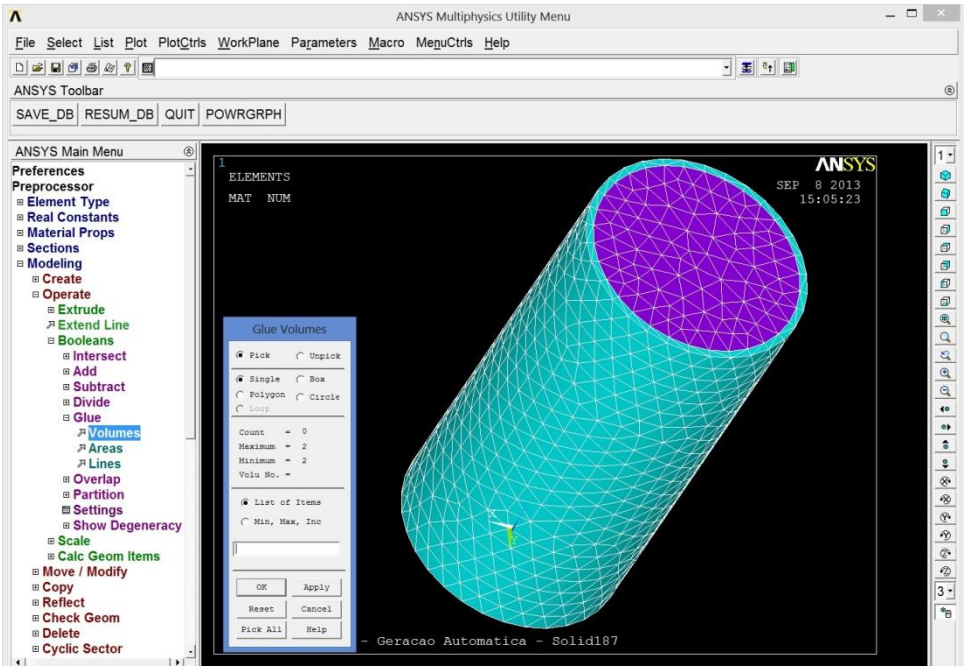

Figura 3-5 - Ferramenta "Glue"

5- Definidas as restrições na base do perfil misto e o carregamento no topo do conjunto por meio de incrementos de deslocamento axial dos nós constantes nesta região.

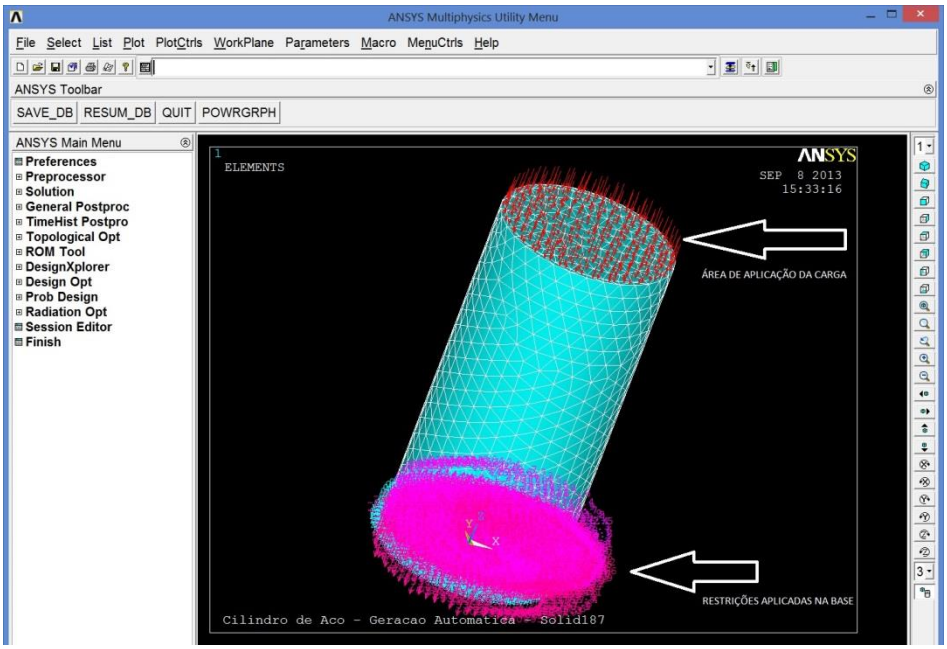

Figura 3-6 - Definição das restrições e do carregamento

6- Simulação do carregamento aplicado nos materiais.

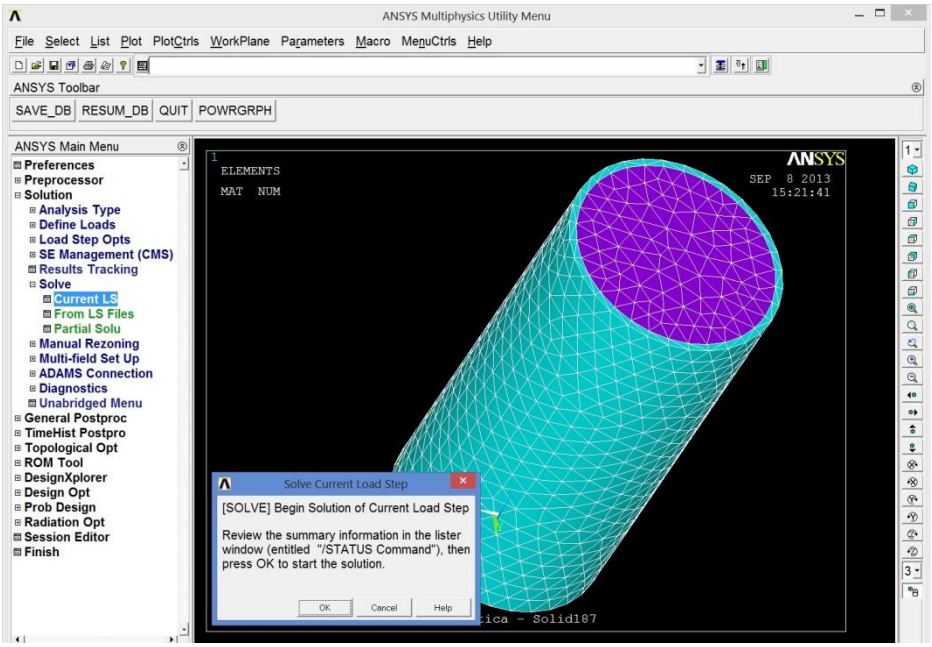

Figura 3-7 - Simulação do carregamento

3.2 Ensaios em laboratório.

3.2.1 Materiais utilizados nos ensaios de perfis tubulares metálicos preenchidos com concreto.

Para o ensaio prático em laboratório do experimento foram utilizados os seguintes materiais:

- Tubo de Aço ASTM de 3 pol., Schedule 40 sem costura 88,90 x 5,49 mm com 5800mm de comprimento, aço de média resistência MR 250 (fy = 250Mpa e fu = 400Mpa), sendo 88,9 mm a dimensão da área do perfil e 5,49mm a espessura da parede do tubo, conforme Figura 3-8.



Figura 3-8 - Tubo de aço

- Cimento Portland CP-II E-32 da marca Votoran, indicado para uso e aplicação geral.
- Agregado miúdo, onde foi utilizado areia média com granulometria entre 0,2 e 0,6mm, segundo a norma técnica NBR 7211:2005.
- Agregados graúdos, onde foram utilizados brita 01 com faixa granulométrica entre 12,5 e 22 mm, e brita 02, com faixa granulométrica entre 22 e 32 mm, conforme norma NBR 7211:2005.
- Água, onde o volume utilizado foi determinado através do fator água/cimento do traço do concreto, que será demonstrado a seguir.
- Aditivo plastificante auto adensável, responsável por garantir maior fluidez e melhor trabalhabilidade para a modelagem dos corpos de prova. Foi utilizado aditivo plastificante para concreto Power Flow 1130, do fabricante Mc-Bauchemie.



Figura 3-9 - Aditivo plastificante

3.2.2 Traço do concreto utilizado no ensaio.

O traço característico em volume do concreto convencional utilizado foi o 1: 2: 3 (cimento: areia: brita), para obter uma resistência aproximada de 25 MPa na idade de 28 dias, representado na Tabela 3-1.

TABELA CONSUMO DE MATERIAIS POR M³ DE CONCRETO

Passe o cursor constantemente sobre o traço p/ ver suas principais aplicações

TRAÇO EM VOLUME	CONSUMO POR M³ DE CONCRETO								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (provável) - MPa			TRAÇO EM MASSA
	CIMENTO			AREIA		BRITA		ÁGUA				
C : A : B	kg	Saca 50kg	Litro	Seca (L)	Úmida (L)	Nº. 1 (L)	Nº. 2 (L)	Litros para areia seca	3 dias	7 dias	28 dias	C : A : B
1 : 1 : 2	514	10,30	363	363	465	363	363	226	22,8	30,0	40,0	1 : 1,08 : 1,96
1 : 1,5 : 3	387	7,70	273	409	524	409	409	189	18,8	25,4	35,0	1 : 1,63 : 2,94
1 : 2 : 2,5	374	7,50	264	528	676	330	330	206	14,8	20,8	29,8	1 : 2,17 : 2,44
1 : 2 : 3	344	6,90	243	486	622	364	364	210	11,7	17,2	25,4	1 : 2,17 : 2,94
1 : 2,5 : 3	319	6,40	225	562	719	337	337	207	10,0	15,0	22,8	1 : 2,71 : 2,94
1 : 2 : 4	297	5,94	210	420	538	420	420	202	9,0	13,7	21,0	1 : 2,17 : 3,92
1 : 2,5 : 3,5	293	5,86	207	517	662	362	362	208	8,0	12,3	19,5	1 : 2,71 : 3,42
1 : 2,5 : 4	276	5,50	195	487	623	390	390	201	7,4	11,4	18,5	1 : 2,71 : 3,92
1 : 2,5 : 5	246	4,90	174	435	557	435	435	195	5,8	9,4	15,7	1 : 2,71 : 4,89
1 : 3 : 5	229	4,60	162	486	622	405	405	202	4,0	7,0	12,4	1 : 3,25 : 4,89
1 : 3 : 6	208	4,20	147	441	564	441	441	198	3,0	5,4	10,0	1 : 3,25 : 5,87
1 : 4 : 8	161	3,20	114	456	584	456	456	194	Não	Não	Não	1 : 4,34 : 7,83

DADOS GERAIS	AREIA	BRITA 1 e 2	CIMENTO	SACA DE CIMENTO	FATOR DE CONVERSÃO
MASSA ESPECÍFICA REAL	2,62	2,56	3,05	50kg = 35,3 litros	1MPa = 10kgf/cm²
MASSA ESPECÍFICA APARENTE	1,54	1,39	1,42		

Tabela 3-1 - Consumo de materiais por m³ de concreto.

Fonte: INTERNET – (http://irapuama.dominiotemporario.com/doc/TABELAS_CONCRETOS_E_ARGAMASSAS.pdf)

A Tabela 3-1 caracteriza a receita para 1,0 m³ de concreto, porém para a modelagem dos nossos corpos de prova utilizamos 5% do volume de 1,0 m³. Desta forma, o quantitativo dos materiais foi o seguinte:

Cimento = 17,2 Kg

O traço em massa para a resistência de 25 MPa em 28 dias representado na tabela acima, caracteriza que para 1 Kg de cimento, é necessário 2,17 Kg de areia e 2,94 Kg de Brita.

Desta forma, o volume dos agregados foram os seguintes:

Areia = 37,32 Kg

Brita = 50,57 Kg

Como este traço solicita que 50% do agregado graúdo seja a brita 01 e o restante com brita 02, desta forma:

Brita 01 = 25,28 Kg

Brita 02 = 25,28 Kg

O fator água/cimento para a resistência de 25 MPa para o concreto convencional na idade de 28 dias foi de 0,67, conforme Figura 2-6 - Gráfico da curva de Adams, desta forma o volume de água utilizada foi de:

Água = 11,52 L

Como havia a necessidade de obter uma boa trabalhabilidade do concreto para a modelagem dos corpos de prova, foi utilizado o aditivo plastificante Power Flow 1130 do fabricante Mc-Bauchemie a fim de tornar o material auto adensável e garantir o preenchimento de todo o elemento. Na ficha técnica do produto aconselha-se a utilização de 400 ml do aditivo para cada 100 Kg de concreto. Como a quantidade de concreto utilizada foi de 17,2 Kg, a quantidade de aditivo utilizado foi de:

Aditivo = 68 ml.

3.2.3 Moldagem dos corpos de prova.

Os equipamentos utilizados foram:

- Betoneira;
- Carrinho de mão;
- Molde cilíndrico;
- Molde tronco-cônico para “Slump test”;
- Balança de precisão;
- Colher de pedreiro;
- Haste metálica para vibração e verificação do “Slump test” do concreto;
- Chapa de aço para realização do “Slump test” e base para os tubos de aço preenchido com concreto;

Na realização do experimento para moldar os corpos de prova, foram inseridos primeiramente na betoneira os agregados graúdos (brita 01 e brita 02). Após este procedimento, a betoneira foi ligada e logo em seguida foi inserida a água. A homogeneização da mistura de agregado graúdo com a água foi realizada

por cerca de 4 minutos até a inserção do agregado miúdo (areia). Esta segunda etapa durou cerca de mais 5 minutos. Na penúltima etapa adicionou-se o cimento, onde a homogeneização também durou cerca de 5 minutos. No fim, aplicou-se o aditivo plastificante para um melhor adensamento do concreto. Este procedimento durou até que o material apresentasse uma forma mais fluida, de modo a garantir melhor trabalhabilidade. A utilização do aditivo foi adotado para que a moldagem ocorresse sem nenhuma falha no preenchimento do tubo, tanto no corpo de prova do concreto quanto na moldagem do elemento misto aço-concreto Figura 3-10.



Figura 3-10 - Concreto homogeneizado

Com o concreto moldado, realizou-se o “Slump test” para verificação da trabalhabilidade do material. Foi constatado um Slump de 18 cm, que significou uma melhora considerável da trabalhabilidade do concreto para a moldagem dos corpos de prova, conforme Figura 3-11.



Figura 3-11 - "Slump test"

Por fim, foi realizada a moldagem dos corpos de prova. Para garantir uma maior confiabilidade nos resultados, foram moldados 18 elementos:

- 06 corpos de prova do perfil tubular metálico com o preenchimento do concreto (tubo cheio);
- 06 corpos de prova do perfil metálico sem o preenchimento do concreto (tubo vazado);
- 06 corpos de prova de concreto para determinação da resistência característica.



Figura 3-12 - Corpos de prova

3.2.4 Ensaio dos corpos de prova.

Para realização dos ensaios utilizou-se a prensa marca EMIC modelo PC200 com as características abaixo, conforme Quadro 3-1.

Quadro 3-1 - Características da prensa

Tipo de acionamento	Elétrico (monofásico)
Modo de leitura	Módulo eletrônico
Sistema de medição	Célula de carga
Capacidade	2MN (200.000kgf)
Curso útil do pistão	25mm

Fonte: INTERNET (http://www.emic.com.br)

Os corpos de prova foram ensaiados 35 dias após a moldagem.



Figura 3-13 - Corpos de prova ensaiados

O procedimento adotado foi ensaiar de forma alternada um corpo de prova do tubo misto e outro do tubo vazado, para analisar, na sequência, se ocorreria alguma diferença no comportamento dos materiais. Após este procedimento foram ensaiados os corpos de prova de concreto puro.

Deste modo, os ensaios seguiram a seguinte ordem:

- Tubo metálico preenchido com concreto (ensaios 01, 03, 05, 07, 09 e 11);
- Tubo metálico sem preenchimento de concreto (ensaios 02, 04, 06, 08, 10 e 12);
- Corpos de prova de concreto (ensaios 13, 14, 15, 16, 17 e 18).

No ensaio do primeiro corpo de prova do elemento misto, observou-se a ocorrência de flambagem local do elemento com a força aplicada pela prensa.



Figura 3-14 - Corpo de prova na prensa

O ensaio ficou limitado à deformação de 25 mm dado o curso da prensa. A Figura 3-15 apresenta a deformação do tubo misto aço-concreto, localizado no centro, quando comparado com perfis que ainda não haviam sido ensaiados. O tempo médio para o término do ensaio de cada elemento foi de aproximadamente 6 minutos e 30 segundos.



Figura 3-15 – Comparação de tubos ensaiados e não ensaiados.
Esquerda: Tubo vazado não ensaiado;
Direita: Tubo preenchido não ensaiado;
Centro: Tubo preenchido ensaiado.

No ensaio do primeiro tubo, sem o preenchimento do concreto, foi visível como a deformação ocorreu de forma mais pronunciada do que no tubo preenchido. O tempo médio de ensaio dos elementos vazados foi de aproximadamente 4 minutos e 20 segundos.

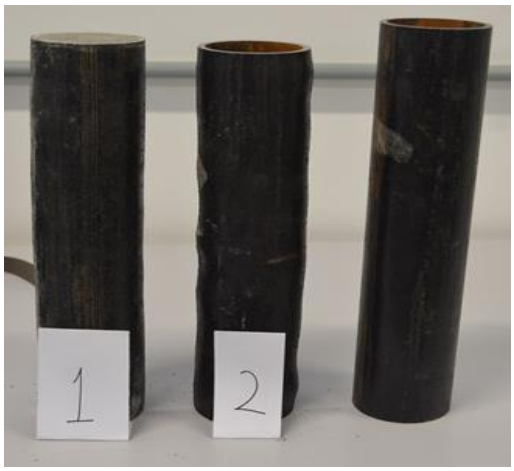

Figura 3-16 – Comparação dos ensaios:
Esquerda: Tubo vazado não ensaiado;
Direita: Tubo preenchido não ensaiado;
Centro: Tubo preenchido ensaiado.

Na Figura 3-16 foi feita a comparação entre um perfil misto (elemento 1), um perfil vazado (elemento 2) ensaiados e um perfil que ainda não havia sido ensaiado. É visível como a deformação no elemento vazado é mais aparente que no elemento misto, sofrendo um achatamento de aproximadamente 10 mm a mais em relação ao tubo preenchido com concreto.

Na Figura 3-17 ressalta-se mais uma vez o comportamento dos elementos mistos em relação aos elementos vazados.

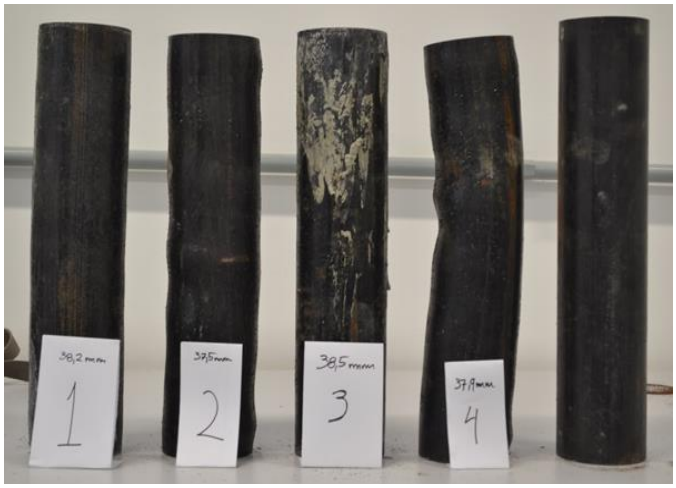

Figura 3-17 - Ensaios 1, 2, 3, 4 e um tubo sem ensaiar.

Na Figura 3-18 foi mostrada uma sequência de deformações do elemento vazado em solicitação de compressão.



Figura 3-18 - Tubo sendo ensaiado

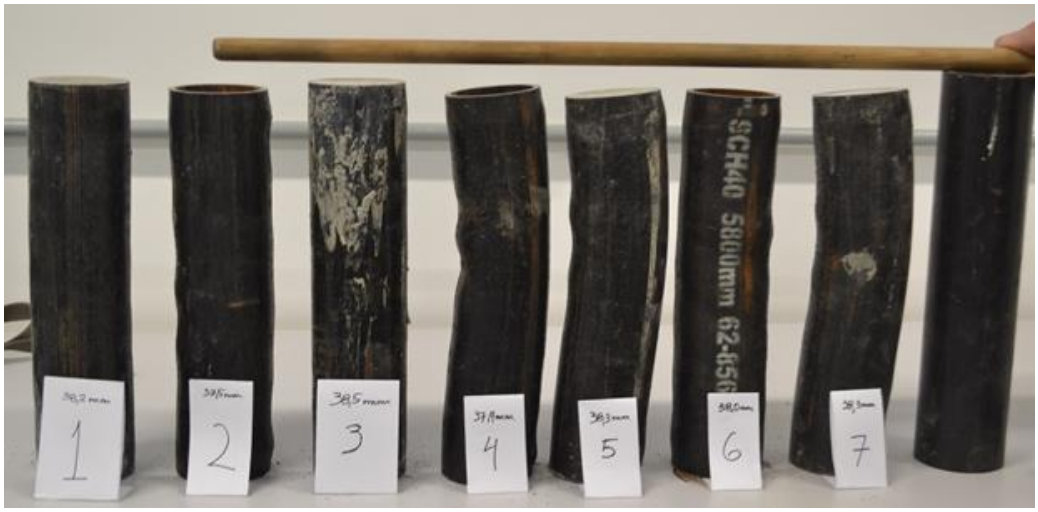

Figura 3-19 - Achatamento dos tubos

Na Figura 3-19 foi feita uma comparação entre os perfis tubulares preenchidos com concreto e os perfis tubulares vazados após o ensaio de compressão, onde todos atingiram tensão superior à do escoamento do aço.



Figura 3-20 - Deformação de tubo preenchido (Esquerda) e vazio (Direita)

No perfil misto, a ocorrência da flambagem localizada não foi tão visível quanto no elemento vazado.

Os ensaios dos corpos de prova de concreto foram caracterizados pelo rompimento destes, fato bem mais visível do que o escoamento do aço, conforme Figura 3-21.



Figura 3-21 - Corpos de prova de concreto rompidos

Na Figura 3-21 apresentam-se todos os corpos de prova após ensaio.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados Obtidos dos ensaios práticos

Os resultados do laboratório foram plotados, para obter as curvas de correlação carga x tempo.

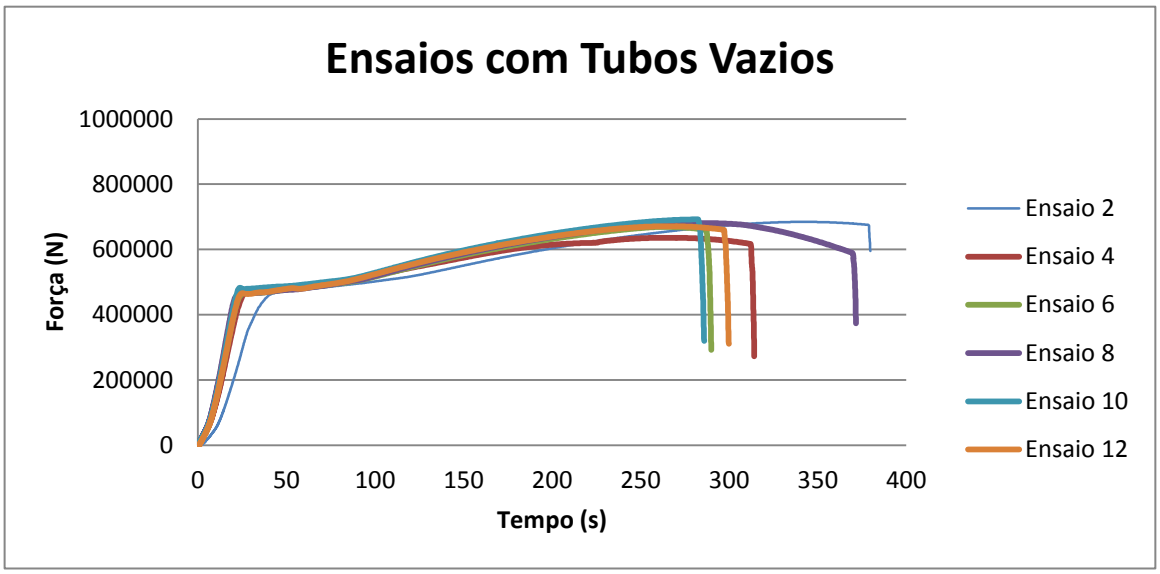

Figura 4-1 - Ensaios com tubos vazios

Na execução dos ensaios, verificou-se que a prensa não tinha o equipamento que captura a deformação do corpo de prova através do deslocamento do perfil tubular. Assim, todos os resultados obtidos nos ensaios foram através da relação carga x tempo.

Para se elaborar a Figura 4-1 foram utilizados os ensaios pares, de 2 a 12 dos tubos de aço sem o preenchimento de concreto. Cada ensaio resultou numa curva (força x tempo). Esta mostra todas as curvas dos ensaios e também mostra a semelhança encontrada nestes ensaios. Este gráfico também auxiliou na estimativa da tensão de escoamento do aço utilizado.

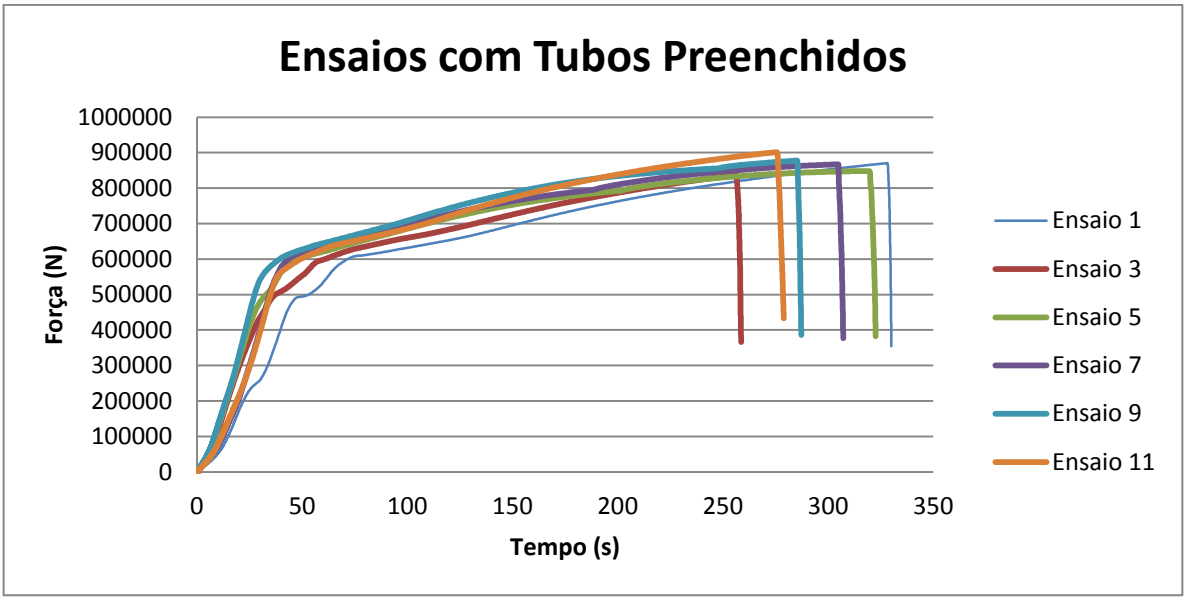

Figura 4-2 - Ensaios com tubos preenchidos

Para elaborar a Figura 4-2 foram utilizados os ensaios ímpares, de 1 a 11 dos tubos de aço com o preenchimento de concreto. Cada ensaio forneceu como resultado uma curva (força x tempo). Esta mostra todas as curvas dos ensaios e também mostra a semelhança encontrada nestes ensaios. Este gráfico também auxiliou na estimativa da tensão de escoamento e da capacidade de carga do elemento misto. Pode-se observar nos gráficos que o tempo para chegar próximo ao início de escoamento é maior no elemento misto, do que no elemento vazado.

- Os resultados dos ensaios do rompimento dos corpos de prova de concreto estão demostrados na Tabela 4-1.

Ensaio	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Força (kgf)	Tensão (MPa)
13	100	7.853,98	19.010,02	23,74
14	100	7.853,98	21.463,28	26,80
15	100	7.853,98	22.057,68	27,54
16	100	7.853,98	18.685,80	23,33
17	100	7.853,98	17.194,40	21,47
18	100	7.853,98	18.674,99	23,32

Tabela 4-1- Resultados do rompimento dos corpos de prova de concreto

O rompimento dos corpos de prova de concreto simples (n.°13 a n.°18), foram executados após os ensaios dos perfis metálicos. Estes resultados foram utilizados para determinação da resistência característica do concreto.

4.2 Análise dos resultados dos ensaios de laboratório

- Foram analisadas três hipóteses para determinação da tensão de escoamento do elemento misto, conforme é demonstrado na Figura 4-3. A primeira (ponto A) no final do comportamento linear, onde o material apresenta o regime elástico, a segunda (ponto B) na transição do comportamento linear com o escoamento gradual, onde a presença do concreto alterou o patamar de escoamento, se comparado ao elemento vazado e a terceira (Ponto C) no inicio do escoamento gradual, onde ocorre o início do regime plástico do elemento.

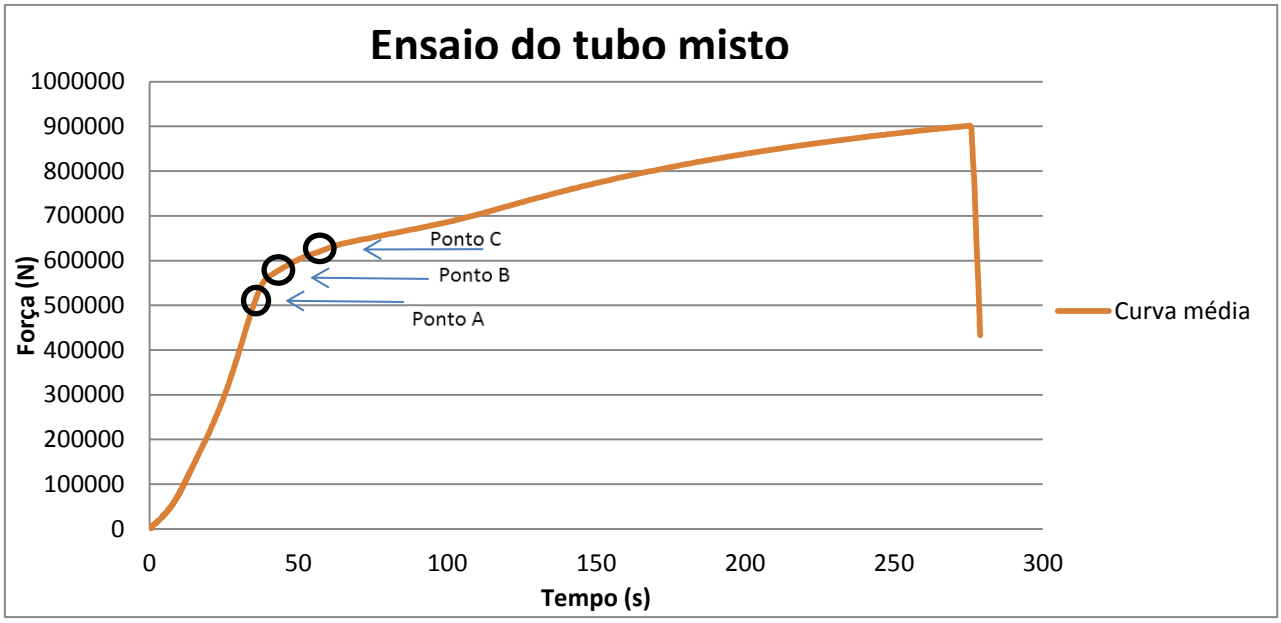

Figura 4-3 - Representação gráfica da curva média do módulo de elasticidade do elemento misto.

A Figura 4-3 foi obtida através da média dos ensaios dos perfis tubulares mistos.

- Ponto A.
  F = 523,36 KN.
- Ponto B.
  F = 571,17 KN.
- Ponto C.
  F = 615,97 KN.

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova de concreto foram trabalhados de forma a conseguir uma resistência média, considerando um desvio padrão num intervalo de confiança de 95%.

4.2.1 Determinação da resistência do tubo vazio

Para a determinação da resistência média dos seis corpos de prova do perfil metálico vazado, foram utilizados os resultados obtidos no ensaio de compressão.

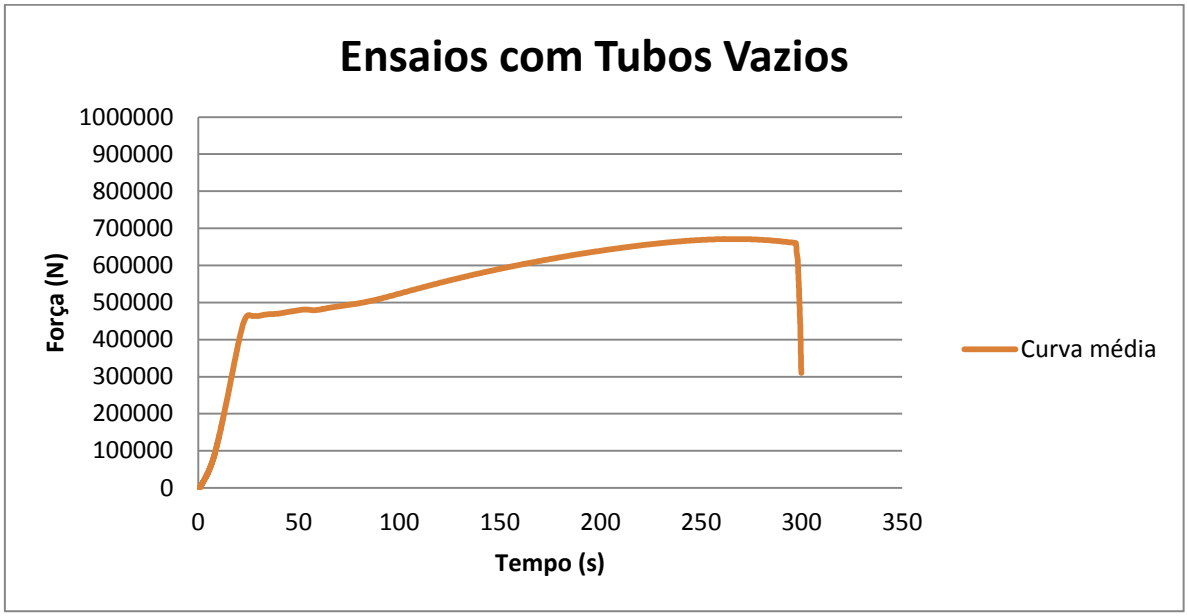

Figura 4-4 - Representação gráfica da curva média do módulo de elasticidade do elemento vazado.

Na equação (4-1), calculou-se a área da seção do tubo vazado.

$$Av = \frac{\pi * 9^2}{4} - \frac{\pi * 7{,}9^2}{4} = 14{,}47 cm^2 \quad (4\text{-}1)$$

Na equação (4-2) calculou-se a resistência média do tubo vazio, obtida através relação de força sobre área, força esta retirada da Figura 4-4.

$$\sigma y = fy = \frac{F}{Av} = \frac{460KN}{14{,}47cm^2} = 31{,}79KN/cm^2 = 317{,}9MPa \quad (4\text{-}2)$$

4.2.2 Determinação da resistência do tubo preenchido

4.2.2.1 Hipótese 01

Para este cálculo foram utilizados os resultados obtidos na Figura 4-3. O valor da força lido, foi no final do comportamento linear do gráfico do aço preenchido com concreto.

Na equação (4-3) foi calculada a resistência média do tubo preenchido, obtida através da relação de força sobre área (equação (4-1)), força esta retirada da Figura 4-3 ponto A.

$$\sigma y = fy = \frac{F}{Av} = \frac{523KN}{14{,}47cm^2} = 36{,}14KN/cm^2 = 361{,}4MPa \quad (4\text{-}3)$$

4.2.2.2 Hipótese 02

Para este cálculo foram utilizados os resultados obtidos na Figura 4-3. O valor da força lido, neste gráfico, está entre o final do comportamento linear e o inicio do escoamento.

Na equação (4-4) foi calculada a resistência média do tubo preenchido, obtido através da relação de força sobre área (equação (4-1)), força esta retirada da Figura 4-3 ponto B.

$$\sigma y = fy = \frac{F}{Av} = \frac{571KN}{14{,}47cm^2} = 39{,}46KN/cm^2 = 394{,}6MPa \quad (4\text{-}4)$$

4.2.2.3 Hipótese 03

Para este cálculo foram utilizados os resultados obtidos na Figura 4-3. O valor da força lido, neste gráfico, está no inicio do escoamento.

Na equação (4-5) foi calculada a resistência média do tubo preenchido, obtido através da relação de força sobre área (equação (4-1)), força esta retirada da Figura 4-3 ponto C.

$$\sigma y = fy = \frac{F}{Av} = \frac{616KN}{14{,}47cm^2} = 42{,}57KN/cm^2 = 425{,}7MPa \quad (4\text{-}5)$$

4.2.3 Estimativa da deformação no início de escoamento do perfil tubular.

Pelo fato da prensa utilizada no ensaio de compressão do perfil tubular não disponibilizar do equipamento que mede o achatamento do elemento, não foi possível obter a deformação da peça comprimida. Desta forma, estimamos a deformação no início do escoamento do aço através da lei de Hooke, conforme equação (2-1) e por estimativa geométrica dos resultados obtidos nos gráficos de carga x tempo.

$$317{,}9 = \varepsilon * 210.000 \Rightarrow \varepsilon = 0{,}00151 \quad (4\text{-}6)$$

$$\delta = \varepsilon * L \Rightarrow \delta = 0{,}00151 * 400 \Rightarrow \delta = 0{,}606mm \quad (4\text{-}7)$$

A deformação/deslocamento, acima calculados, representa o limite elástico do material. Nos ensaios em laboratório foram atingidos deslocamentos da ordem de 25 mm, sendo que de fato, apenas 0,606 mm estavam em regime elástico e o restante, 24,394 mm, em regime plástico.

4.3 Resultados obtidos do ensaio computacional

Os deslocamentos aplicados no elemento misto foram divididos em 15 passos (Figura 4-5 a Figura 4-19), com incrementos na ordem de 0,05mm por passo.

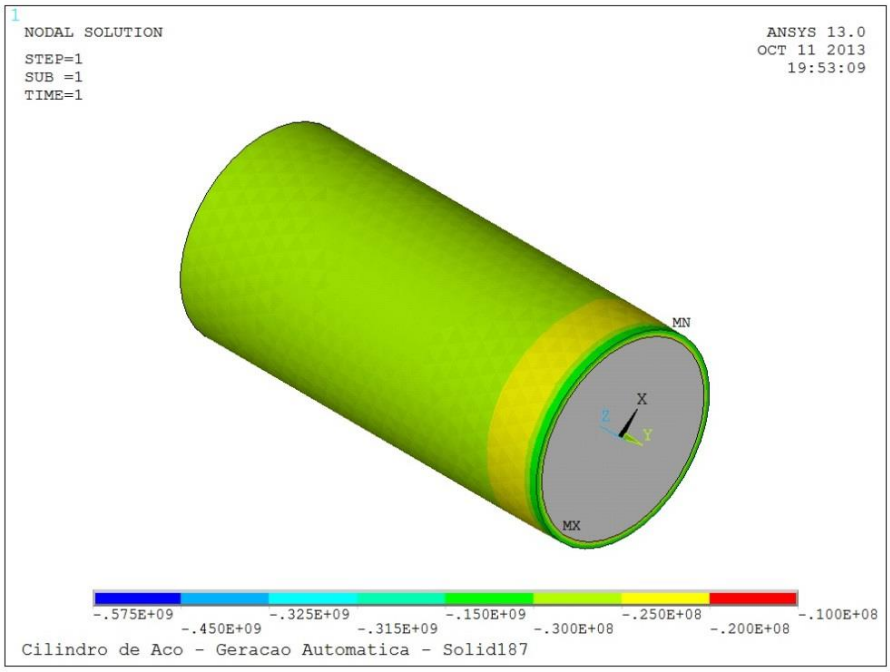

Figura 4-5 - Carregamento: Passo 1

Com deslocamento de 0,05mm, é possível observar pela escala de tensões que apenas o perfil tubular de aço absorve a carga solicitada, o carregamento no concreto ainda não foi solicitado.

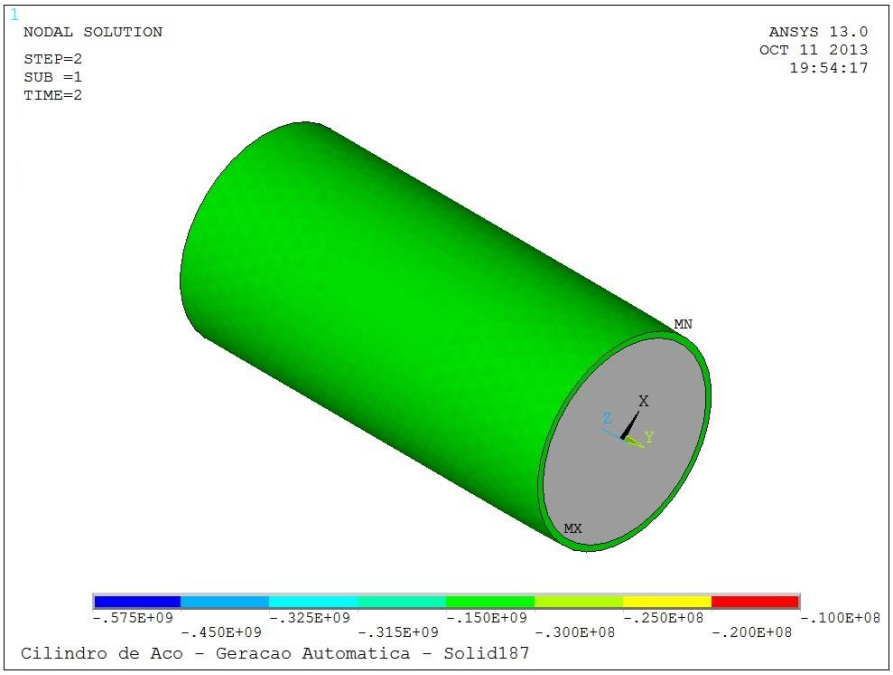

Figura 4-6 - Carregamento: Passo 2

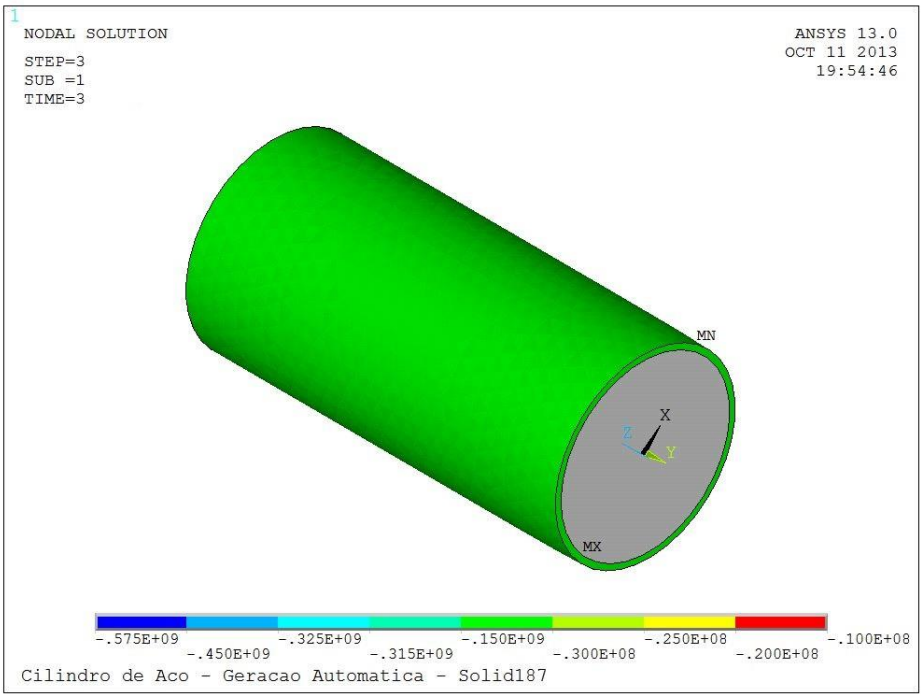

Figura 4-7 - Carregamento: Passo 3

Observou-se que até o passo 3 o material concreto não é solicitado, isto é, todo o esforço de compressão é absorvido pelo perfil tubular de aço.

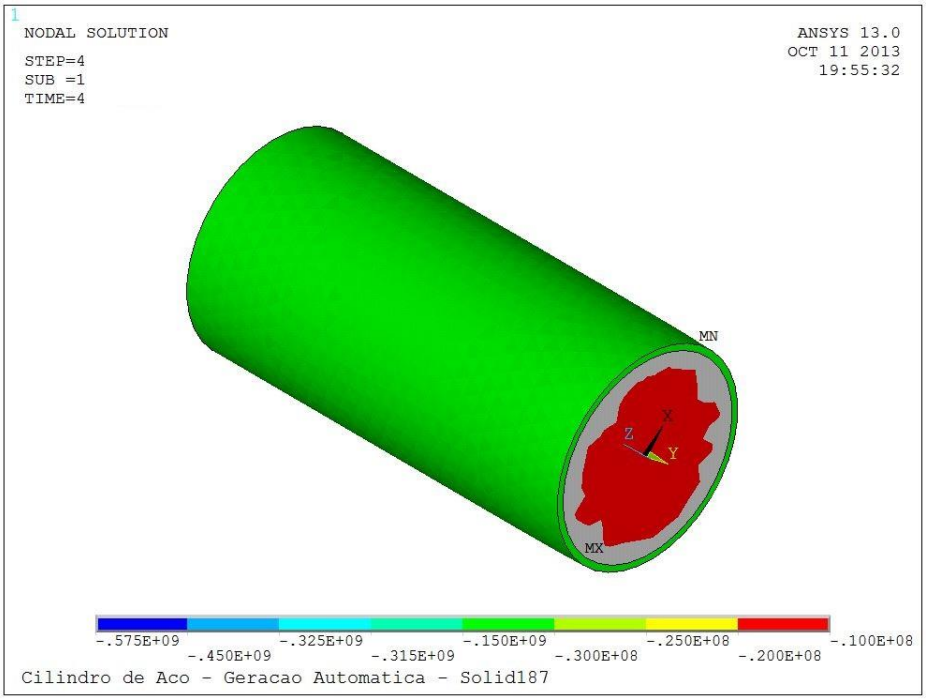

Figura 4-8 - Carregamento: Passo 4 com deslocamento de 0,05mm

Após um deslocamento de 0,20mm, é possível observar que o aço é solicitado e o concreto começa a absorver parte do carregamento aplicado sobre o elemento misto.

Na Figura 4-8 é possível observar o comportamento do concreto. Este começa a ser solicitado do centro para a extremidade do perfil tubular e recebe parte do esforço de compressão.

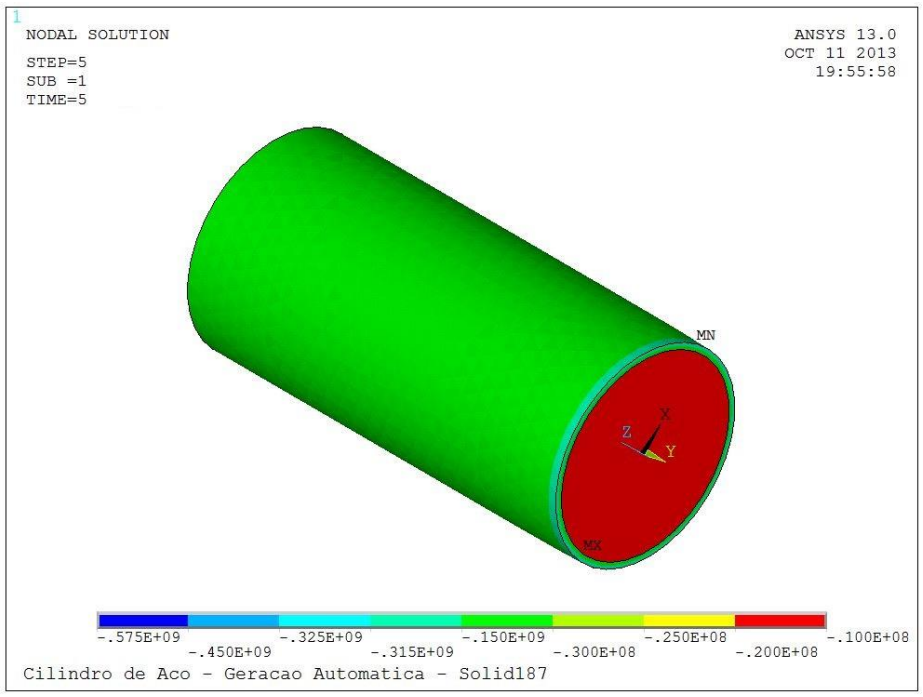

Figura 4-9 - Carregamento: Passo 5

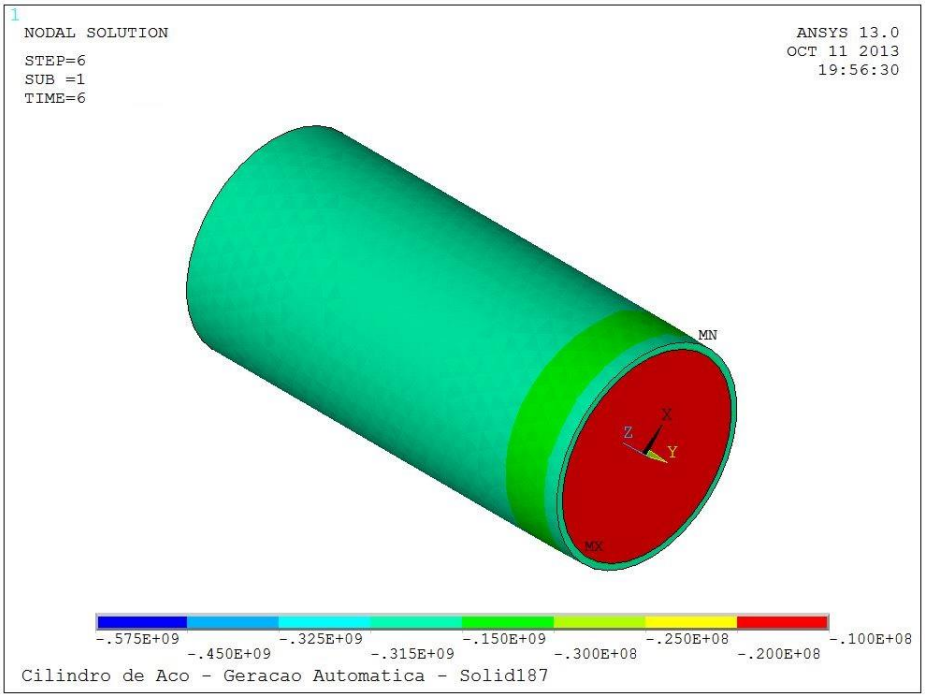

Figura 4-10 - Carregamento: Passo 6

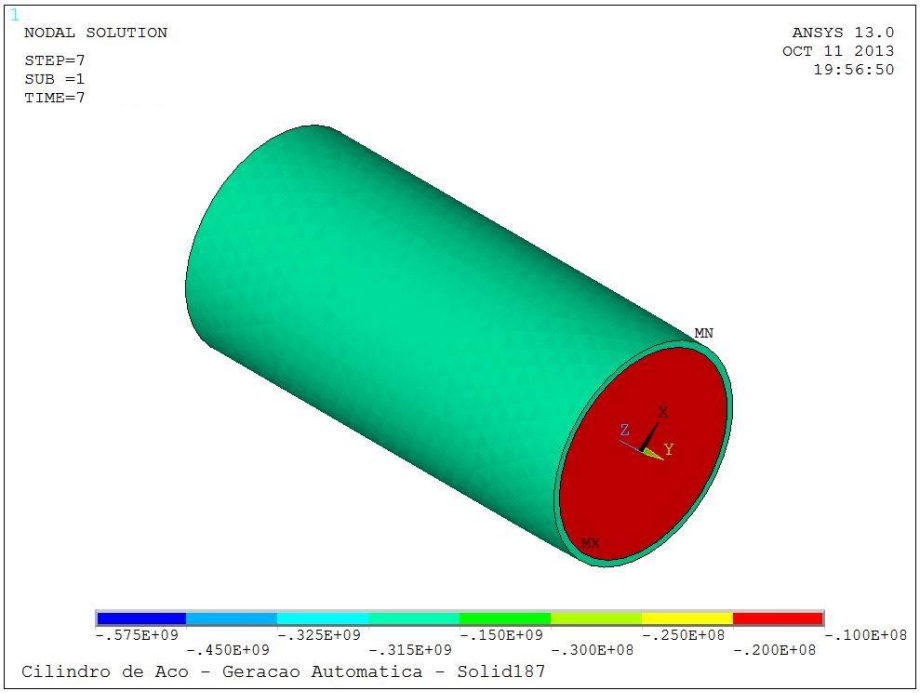

Figura 4-11 - Carregamento: Passo 7

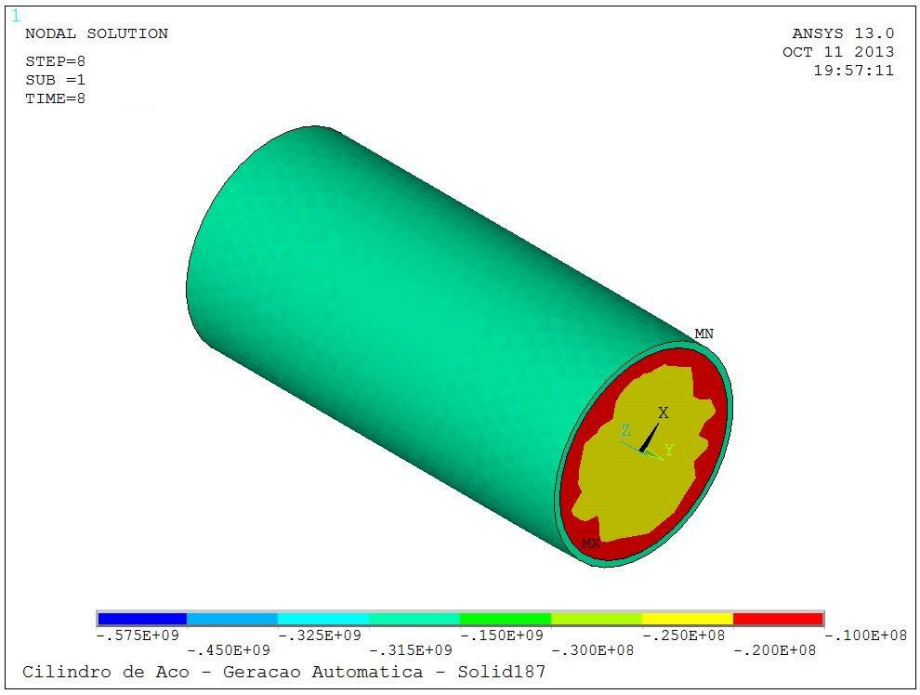

Figura 4-12 - Carregamento: Passo 8

Na Figura 4-12 observamos que o comportamento do perfil metálico está próximo de atingir o seu limite de escoamento (318MPa), da mesma forma o concreto está sendo solicitado entre 15 e 20MPa.

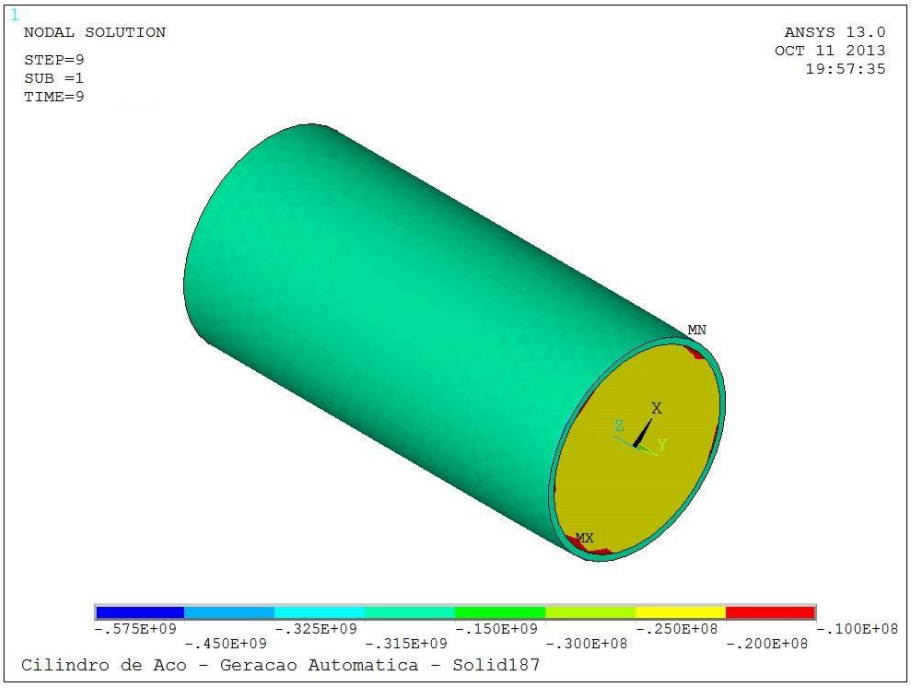

Figura 4-13 - Carregamento: Passo 9

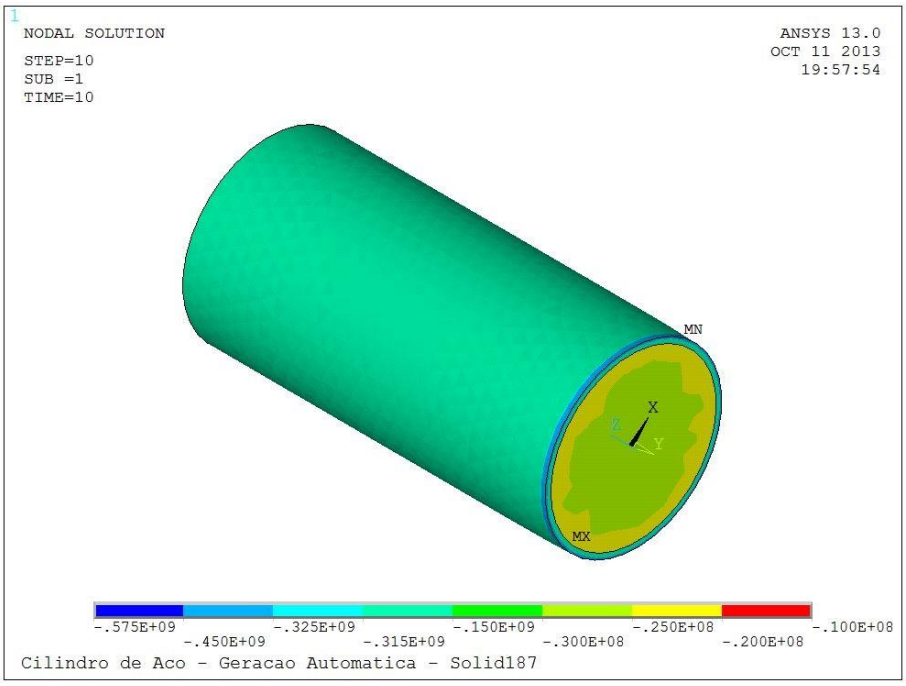

Figura 4-14 - Carregamento: Passo 10

A partir do passo 10, conforme Figura 4-14, verificou-se o comportamento do elemento misto após ultrapassar a tensão de escoamento do aço e o fck do concreto.

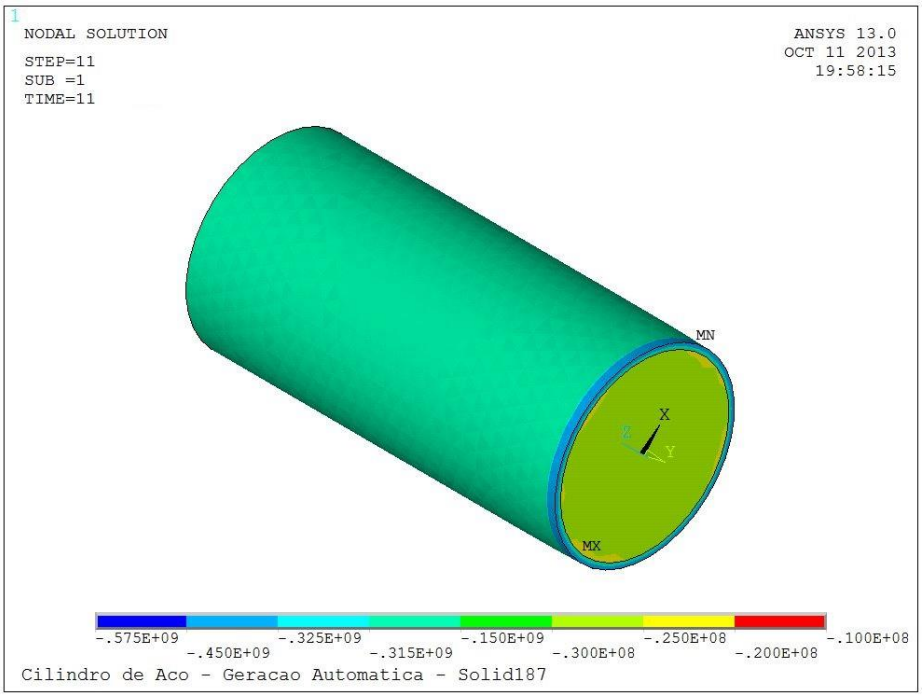

Figura 4-15 - Carregamento: Passo 11

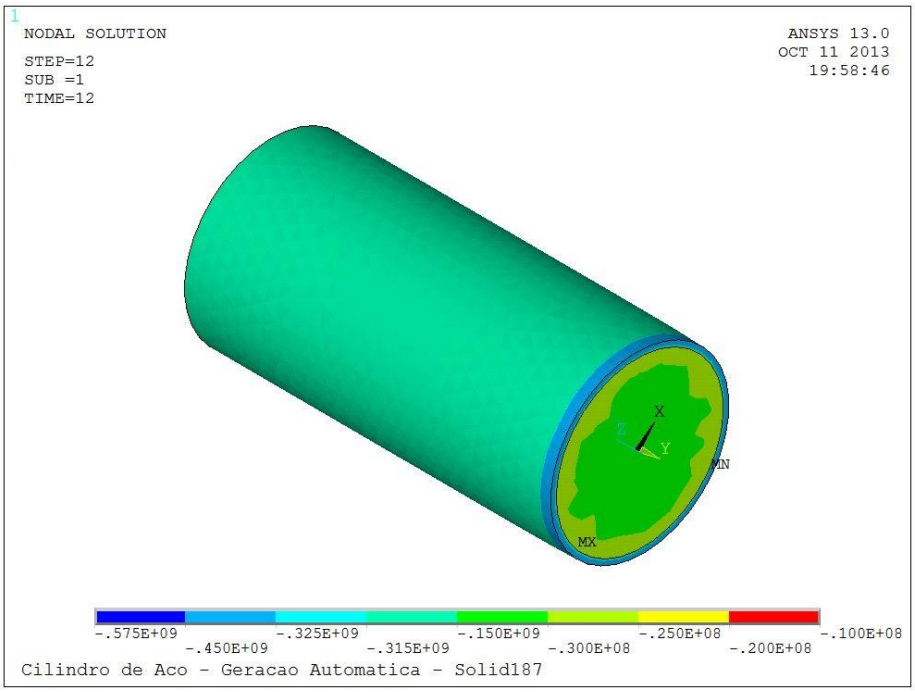

Figura 4-16 - Carregamento: Passo 12

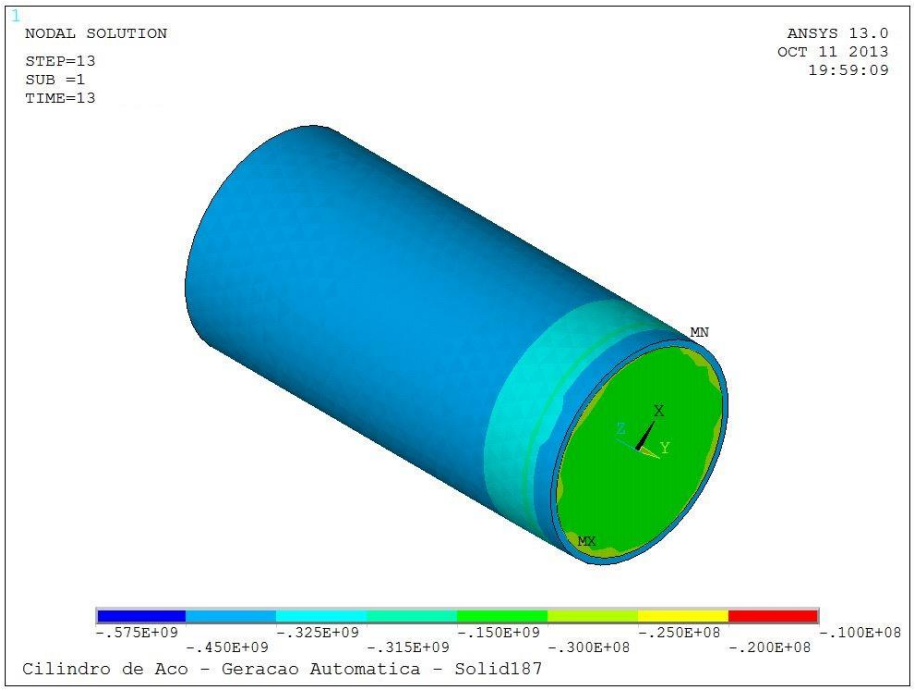

Figura 4-17 - Carregamento: Passo 13

Com deslocamento de 0,65mm, o aço atingiu a sua tensão de escoamento e o concreto a sua tensão de ruptura.

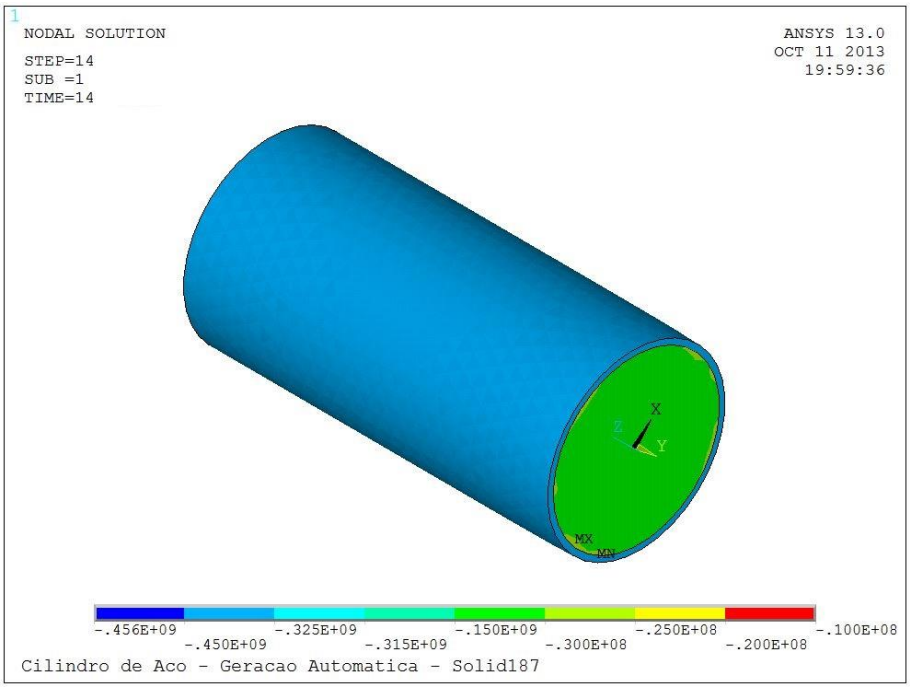

Figura 4-18 - Carregamento: Passo 14

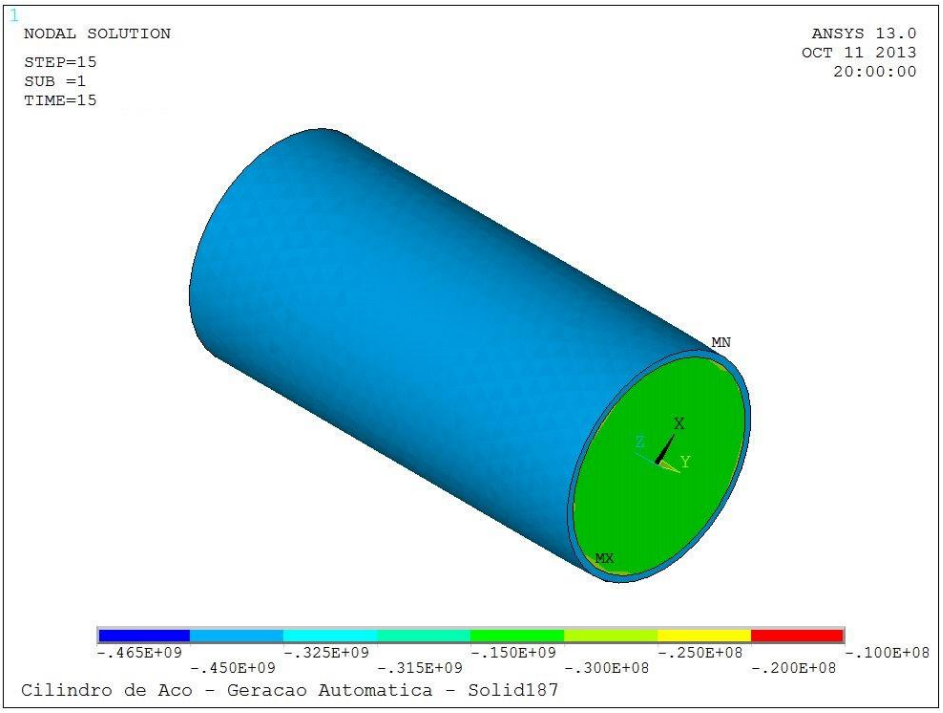

Figura 4-19 - Carregamento: Passo 15

Verificou-se que o ensaio computacional apresentou, de forma clara, o comportamento do elemento misto quando submetido a uma força de compressão.

4.4 Determinação da resistência do concreto

Na equação (4-8) calculou-se a resistência aproximada do concreto ensaiado, utilizando a média dos resultados obtidos.

$$\sigma_{médio} = \frac{23{,}74 + 26{,}80 + 27{,}54 + 23{,}33 + 21{,}47 + 23{,}32}{6} = 24{,}37MPa \quad (4\text{-}8)$$

O desvio padrão encontrado para a amostra foi de 2,32 MPa, num nível de confiança de 95% utilizando a distribuição normal. Desta forma chegou-se a um intervalo de confiança unicaudal a esquerda de:

$$\sigma_{adotado} = 22{,}51MPa \quad (4\text{-}9)$$

4.4.1 Comparação dos resultados

Elemento	Força Máxima (KN)	Tensão (MPa)
Tubo Vazio	460,00	317,90
Tubo Preenchido H1*	523,36	361,40
Tubo Preenchido H2*	571,17	394,60
Tubo Preenchido H3*	615,97	425,70
Concreto		22,51

* Hipóteses 1, 2 e 3

- Relação de forças para os pontos A, B e C em relação ao tubo vazio, respectivamente:

$$Rel\ A = \frac{523}{460} = 1{,}14\ ou\ seja\ 14\%\ de\ ganho\ de\ capacidade\ de\ carga$$

$$Rel\ B = \frac{571}{460} = 1{,}24\ ou\ seja\ 24\%\ de\ ganho\ de\ capacidade\ de\ carga$$

$$Rel\ C = \frac{616}{460} = 1{,}33\ ou\ seja\ 33\%\ de\ ganho\ de\ capacidade\ de\ carga$$

Fica evidente um ganho na capacidade de carga do elemento misto quando comparado ao perfil tubular sem o preenchimento.

4.4.1.1 Sequencia de cálculo para pilares mistos segundo a norma brasileira NBR8800/2008

A força axial resistente de cálculo é dada pela soma das forças axiais resistentes de cálculo de seus componentes, perfil de aço, concreto e armadura longitudinal, conforme (4-10).

$$Nrd,pl = Nrd,pl,a + Nrd,pl,c + Nrd,pl,s \quad (4\text{-}10)$$

Onde:

Nrd,pl = Força axial resistente de cálculo

a = aço (tubo)

c = concreto

s = aço (vergalhão)

Para o caso do tubo apenas preenchido com concreto, a última parcela referente à armadura é desprezada, portanto:

$$Nrd,pl = Nrd,pl,a + Nrd,pl,c \quad (4\text{-}11)$$

Ou seja:

$$Nrd,pl = fyd * Aa + \alpha * fcd * Ac \quad (4\text{-}12)$$

Onde:

Aa = Área do aço = 14,47cm²

Ac = Área do concreto = 49,04cm²

Da norma NBR8800/2008 $\alpha = 0{,}95$;

$$Nrd,pl = 31{,}79 * 14{,}47 + 0{,}95 * 2{,}2 * 49{,}04 = 562{,}5KN \quad (4\text{-}13)$$

- Relação de forças para os pontos A, B e C com relação à força axial resistente calculada com base na norma NBR8800/2008, respectivamente:

$$Rel\ A = \frac{523{,}36}{562{,}5} = 0{,}93\ ou\ seja\ 7\%\ abaixo\ da\ norma$$

$$Rel\ B = \frac{571{,}17}{562{,}5} = 1{,}02\ ou\ seja\ 2\%\ acima\ da\ norma$$

$$Rel\ C = \frac{615{,}97}{562{,}5} = 1{,}095\ ou\ seja\ 9{,}5\%\ acima\ da\ norma$$

4.4.1.2 Relação de forças de compressão em comparação com a soma algébrica dos elementos

Obtenção da força axial resistente de cálculo sem considerar o coeficiente de minoração adotado pela norma brasileira.

$$Nrd, pl = 31{,}79 * 14{,}47 + 2{,}2 * 49{,}04 = 567{,}89KN \quad (4\text{-}14)$$

- Relação de forças para os pontos A, B e C com relação à força axial resistente calculada na equação (4-14).

$$Rel\ A = \frac{523{,}36}{567{,}89} = 0{,}92\ ou\ seja\ 8\%\ abaixo\ da\ soma\ algébrica$$

$$Rel\ B = \frac{571{,}17}{567{,}89} = 1{,}01\ ou\ seja\ 1\%\ acima\ da\ soma\ algébrica$$

$$Rel\ C = \frac{615{,}97}{567{,}89} = 1{,}08\ ou\ seja\ 8\%\ acima\ da\ soma\ algébrica$$

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A utilização de sistemas estruturais tubulares mistos de aço preenchido com concreto, no tocante à construção de torres de transmissão de energia, é ainda algo muito recente na engenharia brasileira. Tecnologia esta, que vem sendo estudada com mais profundidade e difundida em maior escala no exterior.

A modelagem computacional feita com método dos elementos finitos através do software Ansys somada com os ensaios práticos possibilitou a análise do comportamento do elemento misto, submetido ao esforço de compressão. Os resultados obtidos foram satisfatórios se comparados ao mesmo perfil tubular sem a presença de concreto no seu interior.

Analisando a curva dos ensaios dos corpos de prova do perfil tubular metálico, verificou-se que o concreto no elemento misto começa a atuar de forma mais efetiva a partir do inicio do escoamento do aço. Isto ficou claro através da Figura 4-1 (perfil tubular metálico vazado) e da Figura 4-2 (Perfil tubular metálico preenchido com concreto).

No gráfico do perfil tubular vazado, a curva de escoamento do aço é bem definida. A partir desta curva, pode-se observar claramente o comportamento do material aço. Verificou-se também que suas deformações são bem acentuadas, como demonstradas nas imagens dos ensaios em laboratório.

No perfil tubular misto, a curva de escoamento do elemento misto não é tão definida se comparada ao perfil tubular vazado. A partir do momento em que o aço inicia o escoamento, é percebido que o concreto começa a atuar, suavizando a curva, deste modo, não ocorre o escoamento do aço de forma tão pronunciada. Após ser atingida a tensão de escoamento do aço, o elemento misto ainda continua resistindo aos esforços de compressão, e suas deformações são menores se comparadas ao perfil tubular sem o preenchimento de concreto.

O escoamento do elemento misto ficou caracterizado por uma fase de transição onde podemos considerar três hipóteses na determinação da carga que provocou o escoamento. Nestas três possibilidades, o concreto trabalhou de forma

conjunta com o aço, garantindo assim um ganho considerável na capacidade de carga do elemento estrutural.

As Hipóteses A, B e C na Figura 4-3 representam o escoamento médio do perfil tubular metálico com o preenchimento de concreto. Este gráfico demonstra a notação adotada pela norma técnica brasileira e a norma técnica europeia.

A norma exige utilizar um fator de correção minorando a resistência do elemento misto em 5%. Desta forma, a NBR:8800/2008 considera que a resistência a compressão do elemento misto ocorre no ponto médio da curva de transição entre o regime elástico e plástico. Os valores encontrados na hipótese B, são similares aos calculados por esta norma, onde a resistência do elemento misto alcançou aproximadamente 2% acima da resistência calculada da NBR:8800/2008.

Da mesma forma, a norma europeia EUROCODE:4/2004 também adota a hipótese B, onde a resistência do elemento misto aumenta devido ao confinamento do concreto. Através dos cálculos, a resistência do elemento misto aumentou aproximadamente 1% em relação a soma algébrica dos materiais: Aço e concreto. Desta forma, a norma EUROCODE:4/2004 considera que a máxima resistência do elemento misto esteja no ponto médio da fase de transição (ponto B).

Os resultados obtidos nos ensaios demonstraram que no início do carregamento do elemento misto, a resistência é absorvida exclusivamente pelo aço. Após o início do escoamento do aço é que o concreto começa a atuar em conjunto com este, modificando a curva de escoamento do conjunto.

Por este motivo, após o início do escoamento do aço, o elemento misto ainda apresenta uma parcela de resistência. Deste modo, poderíamos considerar a Hipótese C, em que a resistência atingiu aproximadamente 9,5 % a mais, em relação a norma brasileira e 8% a mais em relação à soma algébrica das resistência dos materiais.

Portanto, a utilização de concreto no interior de um perfil tubular mostra-se vantajosa, pois garante um aumento de capacidade de carga considerável, utilizando um material de fácil manuseio e de custo relativamente baixo, se comparado ao custo de uma estrutura de torre de transmissão elétrica.

Além do ganho de resistência a compressão com a utilização do elemento misto, a presença do concreto também garante uma maior sobrevida se a estrutura

for submetida a ações termodinâmicas, pois o concreto tem baixa condutividade e maior resistência a efeitos térmicos.

Quanto ao modelo computacional, foi gerado um modelo similar aos elementos ensaiados de perfil tubular metálico preenchido com concreto. Com este foi possível analisar o comportamento do elemento misto. A partir dos resultados do modelo, representado graficamente, observou-se como a distribuição da tensão ocorre no elemento misto.

Algumas desvantagens foram percebidas ao longo do trabalho como: transporte do material, preparo de concreto em campo, aspectos construtivos tanto da treliça com perfil tubular quanto do lançamento do concreto, etc.

Como sugestões para trabalhos futuros neste tema, podemos elencar:

- Análise térmica do elemento misto;
- Análise do efeito da flambagem do perfil metálico;
- Efeito do confinamento do concreto;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAN, Aloísio Ernesto. **Método dos elementos finitos**. 2ª Edição. Editora Unicamp, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261**: Tubos de aço-carbono, formado a frio, com e sem solda, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. 2010.

BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. **Módulo de elasticidade do concreto.** Comitê Brasileiro de cimento, concreto e agregados. 2007

BATHE, K. T. **Finite element procedures**. New Jersey: A Simon & Schuster Company. Englewood Cliffs, 1996

BEER, Ferdinand P., Johnston JR., E. Russell, Dewolf, John T., Mazurek, David F. **Mecânica dos materiais.** 5.ª Edição. AMGH Editora Ltda. 2011.

BITTENCOURT, Márcio Lúcio. **Análise computacional de estruturas**: com aplicação do Método dos Elementos Finitos. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2010.

CHEN, W. F. Plasticity in reinforced concrete. [S.l.]: J. Ross Pub., 2007.

FILHO, Américo Campos. **Fundamentos da análise estrutural do concreto pelo método dos elementos finitos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRG. 2003.

HELENE, Paulo R. L, TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. SENAI, 1993.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. Editora LTC.

KRÜGER, Denise Araújo Vieira. **Dissertação:** Analise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas. Curitiba – PR. 2001.

KRIPKA, Moacir; CHAMBERLAIN, Zacarias M. **Novos estudos e pesquisa na construção metálica.** Passo Fundo. Editora UPF. 2008.

MALITE, Maximiliano; ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto**. São Carlos, 2005. Caderno de Engenharia de Estruturas São Carlos, v. 7, n. 25, p. 51-84. Universidade de São Paulo.

MASUERO, João Ricardo; CREUS, Guillermo Juan. **Introdução à mecânica estrutural**. Porto Alegre. Editora Universidade/UFEGS, 1997.

MINUTA_NBR_TUBOS_R19, **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares**. Setembro, 2010.

NARDIN, Silvana de. **Viabilidade da utilização de pilares mistos parcialmente revestidos em edifícios de múltiplos pavimentos**: estudo de caso – Contribuição técnica nº 8, ConstruMetal 2010.

OLIVEIRA, Walter Luiz Andrade de. **Dimensionamento de pilares preenchidos de seção circular submetido à compressão simples, segundo a NBR 8800/2008 e Eurocode4**:2004: comparação com resultados experimentais.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800/2008. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, Libânio M., MUZARDO, Cassiane D., SANTOS, Sandro P. **Estruturas de concreto**. Capitulo 2. 2004.

POPOV, Egor P. **Introdução a Mecânica dos Sólidos**. Editor Edgard Blücher Ltda, 1978.

PULIDO, Antônio Carlos; De Nardin, Silvana. **Sistematização do dimensionamento a flexo-compressão de pilares mistos preenchidos de seção retangular**. ConstruMetal 2012.

Revista Exame, São Paulo – SP, 11/03/2013. Sistema elétrico tem mais de 2,2 mil falhas por ano. Disponível em (http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/energia/noticias/sistema-eletrico-tem-mais-de-2-2-mil-falhas-por-ano)

Revista Exame, São Paulo – SP, 06/09/2013. Braskem estima perda de R$50 mi por apagão no Nordeste. Disponível em (http://exame.abril.com.br/negocios/noticias/braskem-estima-perda-de-r-50-mi-por-apagao-no-nordeste)

SCREMIN, Juliano Jorge. **Dissertação**: Análise termo-elástica 2D via método dos elementos finitos aplicada a estimativa de falha em barragens de CCR. Curitiba-PR, 2011.

SILVA, Romulo Dinalli Da. **Dissertação**: Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos. São Paulo, 2006.

SILVA, Valdir Pignatta e; Silva, Paulo Henrique Lubas. **Dimensionamento de pilares mistos de concreto e aço**. Comparação entre modelos normatizados e resultados experimentais. Anais do 54.º Congresso Brasileiro do concreto. CBC2012.

SORIANO, Humberto Lima. **Elementos finitos: Formulação e aplicação na estática e Dinâmica das estruturas.** Editora Ciência Moderna. 2009.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. **Dissertação**: Contribuição ao estudo das estruturas metálicas espaciais. São Carlos – SP. 1998

TEIXEIRA, Rafael Rodrigues. **Dissertação:** Modelagem por elementos finitos para análise de tensões e deformações por fluência no concreto compactado com rolo. Curitiba – PR. 2006.

TIMOSHENKO, Stephen Prokofievich; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**. Volumes 1 e 2. Editora LTC.

Teoria da plasticidade. Elasticidade – Estado de tensão e tensor das tensões. Instituto superior técnico.

APÊNDICE

Sequência de comandos utilizados no software ANSYS para simulação do problema proposto neste trabalho.

! Análise de tubo vazado de aço solicitado por incrementos de carregamento

! Análise transiente

```
FINI
/CLE
/PREP7
! Entrada de Dados:
E_aco    = 200.0e9          ! Módulo de Elasticidade do Tubo
E_conc   = 23.2e9           ! Módulo de Elasticidade do Concreto
ni_aco   = 0.3              ! Coeficiente de Poisson do Aço
ni_conc  = 0.2              ! Coeficiente de Poisson do Concreto
raio     = 0.08890          ! Raio externo do tubo
comp     = 0.40             ! Comprimento longitudinal do tubo
esp          = 0.00549      ! Espessura do tubo
tini     = 1                ! Tempo inicial da análise transiente
tfin     = 15               ! Tempo final da análise transiente
tinc     = 1                ! Incremento de tempo da análise transiente
dispinc = 0.00005           ! Incremento de 0,05 mm por passo
/TITLE, Elemento Misto - Geração Automática - Solid187
/PNUM, KPOI, 1
/PNUM, LINE, 1
/PNUM, AREA, 1
```

```
/PNUM, VOLU, 1
! Dados do material do tubo de aço
MP,   EX, 1, E_aco
MP, NUXY, 1, ni_aco
ET, 1, solid187
TBDE, BISO,1,,,
TB, BISO,1,1,2,
TBTEMP, 0
TBDATA, ,317.9e6,24.e9,,,,
! Dados do cilindro de concreto
MP,   EX, 2, E_conc
MP, NUXY, 2, ni_conc
ET, 2, solid187
CSYS, 0
! CYL4, XCENTER, YCENTER, RAD1, THETA1, RAD2, THETA2, DEPTH
CYL4, 0, 0, raio-esp, 360, raio, 360, comp
CYL4, 0, 0, raio-esp, 360, 0, 0, comp
FLST, 2, 2, 6, ORDE,2
FITEM, 2,1
FITEM, 2,2
VGLUE, P51X
VPLOT
TYPE, 1
MAT, 1
ESIZE, 3*esp
MSHAPE, 1, 3D
```

```
VMESH, 1
TYPE, 2
MAT, 2
ESIZE, 3*esp
MSHAPE, 1, 3D
VMESH, 3
FINI
/SOLU
/PSF, PRES, NORM, 2
/PBC, ALL,  ,2
ANTYPE, 4
TRNOPT, FULL
! Criação de uma tabela de cargas de pressão por incrementos de tempo
! para proceder análise transiente
*DIM, DESLOC, TABLE, (tfin-tini)/tinc, 1, 1, TEMPO
DESLOC(0,1) = 1
indice = 0
*DO, tempo, tini, tfin, tinc
        DESLOC(indice,0) = tempo
        DESLOC(indice,1) = -1*dispinc*(indice+1)
        TIME, tempo
        ! Aplica deslocamento no topo
        ASEL, S, LOC, Z, comp
        DA, ALL, UZ, -1*dispinc*(indice+1)
        !SFA, ALL, 1, PRESS, loadinc*indice
        SBCTRAN
```

```
        ALLSEL
        ! Aplica restrição de deslocamento em todos os nós da base
        NSEL, S, LOC, Z, 0
        D, ALL, UX, 0
        D, ALL, UY, 0
        D, ALL, UZ, 0
        ALLSEL
        SOLVE
        indice = indice + 1
*ENDDO
FINI
/POST1
/CVAL,1,-450e6,-325e6,-315e6,-150e6,-30e6,-25e6,-20e6,-10e6
/PLOPTS, LOGO, 0
```