

Efeito Incremental

Para que a estrutura possa ser analisada com efeito incremental é necessário que o modelo estrutural de cálculo utilizado seja o Modelo VI.

Histórico de carregamento

Ao utilizar a análise com efeito incremental de carga é de extrema importância que o engenheiro conheça o cronograma de construção da obra, pois a análise depende diretamente de como cada fase da obra será construída. Desta forma, serão determinadas as ações consideradas.

Grande parte das ações permanentes de um projeto (peso próprio, revestimento, alvenaria, etc.) carrega a estrutura ainda durante a fase de construções e estas são as principais responsáveis pelas distorções entre os esforços calculados e os que "realmente" aparecem na estrutura. Ou seja, estas ações atuam enquanto a estrutura ainda não foi finalizada e possui módulo de elasticidade diferente do final.

Definições e termos utilizados

A seguir serão apresentadas algumas definições e termos utilizados no restante do texto:

Fases construtivas: etapas pela qual a estrutura passa. Basicamente cada fase construtiva representa a estrutura construída até um determinado pavimento;

Parcela de carga: indica uma porcentagem de um dos casos de carregamento que é aplicada a estrutura após uma determinada quantidade de fases construtivas;

Fase de aplicação de carga: Indica o intervalo de fases construtivas em que uma parcela de carga será aplicada a estrutura;

Dias entre fases: Indica a quantidade de dias entre a construção de cada fase construtiva. Este é um dado básico para análise com variação de módulo de elasticidade;

Fase final: fase considerada como o momento de aplicação das cargas após a construção do edifício.

Teoria básica

A grande diferença entre os processos incremental e linear esta na forma como se trata os deslocamentos, pois, na análise incremental as cargas atuantes em um referido andar não geram tensões e deslocamentos em um andar superior, que ainda não foi construído. Desde modo, quando os deslocamentos do andar inferior já tiverem ocorrido devido ao seu carregamento, na análise da próxima etapa com o andar superior, devem-se considerar nulos todos os carregamentos do inferior e utilizar o princípio da superposição de efeitos.

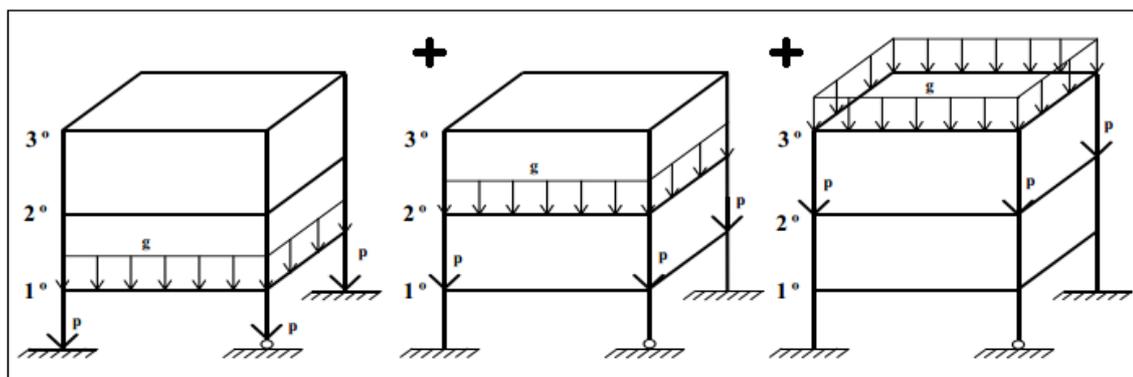


Figura 1 – Edifício com três análises considerando a “Análise Convencional”

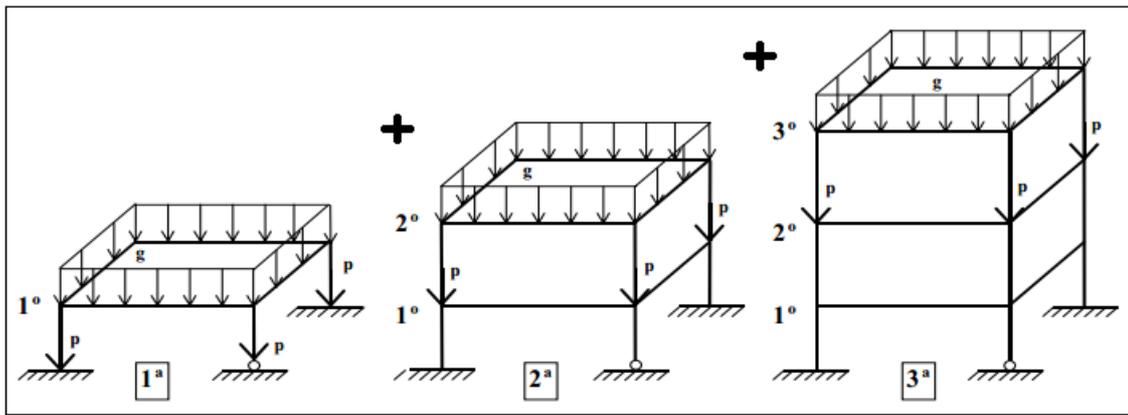
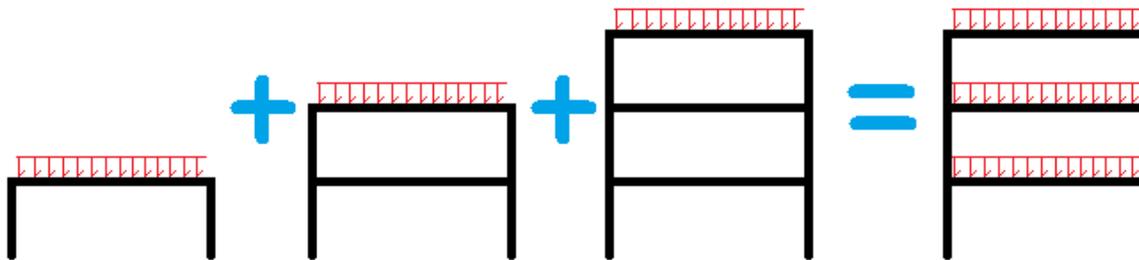


Figura 2 - Edifício com três análises considerando a "Análise Incremental Construtiva"

Segundo Gorza (2000), o método implementado nos Sistemas TQS é chamado de "Processo sequencial direto". Este método consiste na análise realizada de baixo para cima que acompanha diretamente a sequência de montagem e carregamento da estrutura.

Exemplo simples

Um exemplo simples de como uma estrutura é analisada com efeito incremental é apresentado a seguir. Trata-se de um pórtico plano com três pavimentos. A única carga aplicada seria o peso próprio dos pavimentos:



Observa-se que conforme os pavimentos são "montados" o carregamento de peso próprio é aplicado. É importante observar que o carregamento aplicado em um pavimento não gera esforços em pavimentos que ainda não foram "montados".

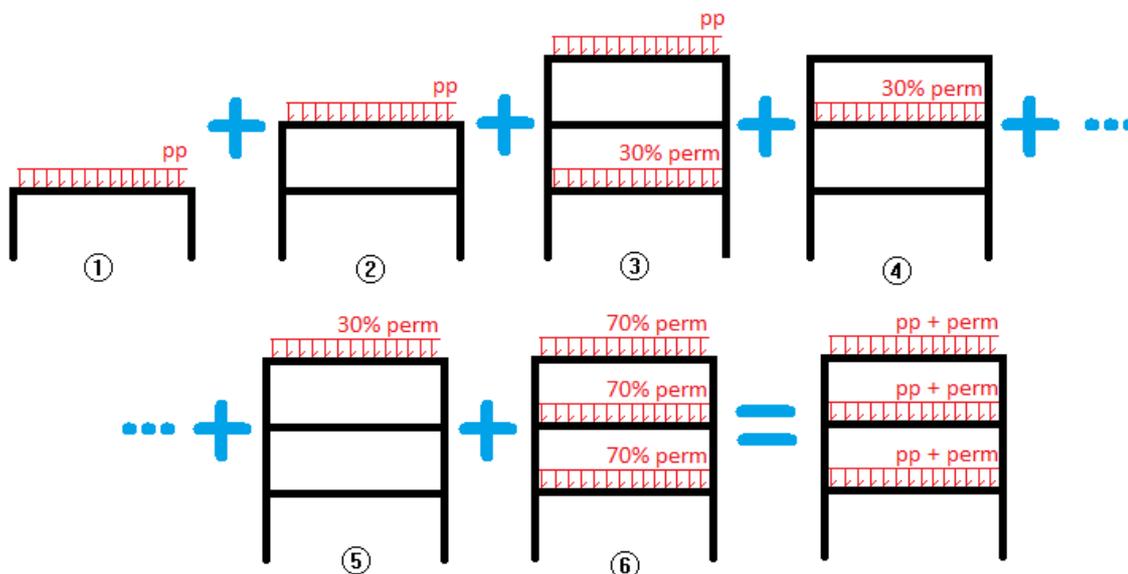
Para cada uma destas três estruturas iniciais é feito o processamento de esforços. Deste modo, através da superposição de esforços, obtemos os resultados finais para a estrutura.

Exemplo com defasagem de carga

Desta vez, um exemplo mais complexo é apresentado. Neste exemplo temos a mesma estrutura, mas com dois carregamentos distintos: peso próprio e permanente.

O peso próprio é aplicado, obviamente, no momento de montagem do pavimento. Já o carregamento permanente será aplicado em duas parcelas: 30% dele duas fases após a "montagem" do pavimento e o restante na fase final.

Neste exemplo estamos utilizando o valor de 7 dias entre as fases construtivas.



(1) Dia:7 – (2) Dia:14 – (3) Dia: 21 – (4) Dia: 28 - (5) Dia:35 – (6) Dia: Infinito

É possível observar que a defasagem da aplicação da carga permanente fez com que fosse necessária a criação de mais dois modelos, além de um modelo específico para a fase final. A superposição de efeitos destes 6 modelos nos permite a obtenção dos esforços solicitante da estrutura.

Apesar de não ter sido utilizado, o módulo de elasticidade dos elementos estruturais poderia variar de acordo com a "idade" dos elementos.

MULAXI e efeito incremental

Nos Sistemas TQS, a consideração do efeito construtivo da edificação, para o Modelo IV e Modelo VI, é feita através de um critério chamado MULAXI. Este critério majora a área axial dos pilares, de modo que sua deformação axial seja minorada na análise estrutural. Esta consideração faz com que os deslocamentos axiais diferenciais entre os pilares sejam minorados. Este critério de projeto é definido no arquivo de critérios do "Pórtico-TQS".

Com a introdução da análise com efeito incremental, o valor do critério MULAXI é ignorado na análise estrutural. Ou seja, durante a análise estrutural os pilares terão área axial bruta. Esta desconsideração é feita para os casos de carregamentos e para as combinações dos modelos analisados com efeito incremental.

Comparação entre modelos

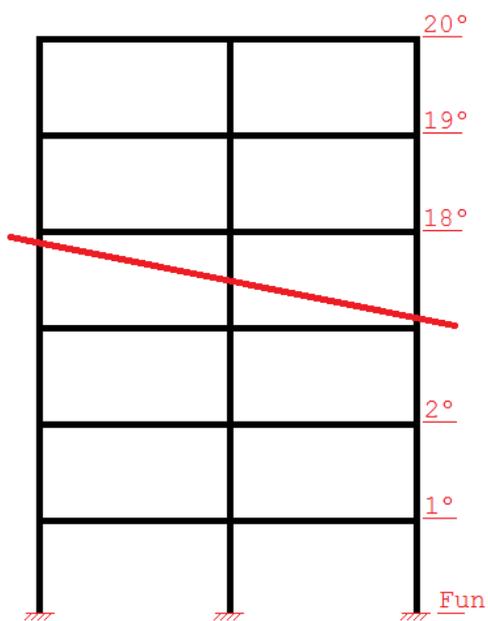
A seguir serão apresentados alguns resultados obtidos através de três modelos estruturais:

Modelo 1: modelo TQS sem MULAXI;

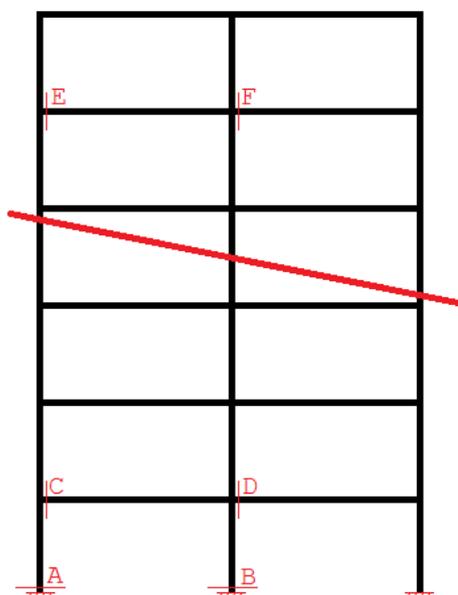
Modelo 2: modelo TQS com MULAXI default (valor igual a 3,0);

Modelo 3: modelo TQS com efeito incremental.

O modelo estrutural é apresentado a seguir. Trata-se de um pórtico plano com 20 pavimentos e geometria totalmente não real. Utilizaram-se os critérios default dos Sistemas TQS para o processamento de esforços, sendo os pilares externos com seções de 80x80 cm, os pilares internos 40x40cm e as vigas com seção 20x60 cm:



Os seguintes pontos serão analisados:



Ou seja, será analisado o esforço normal nos pilares (A e B) e o momento fletor nas vigas do primeiro (C e D) e do penúltimo (E e F) pavimento.

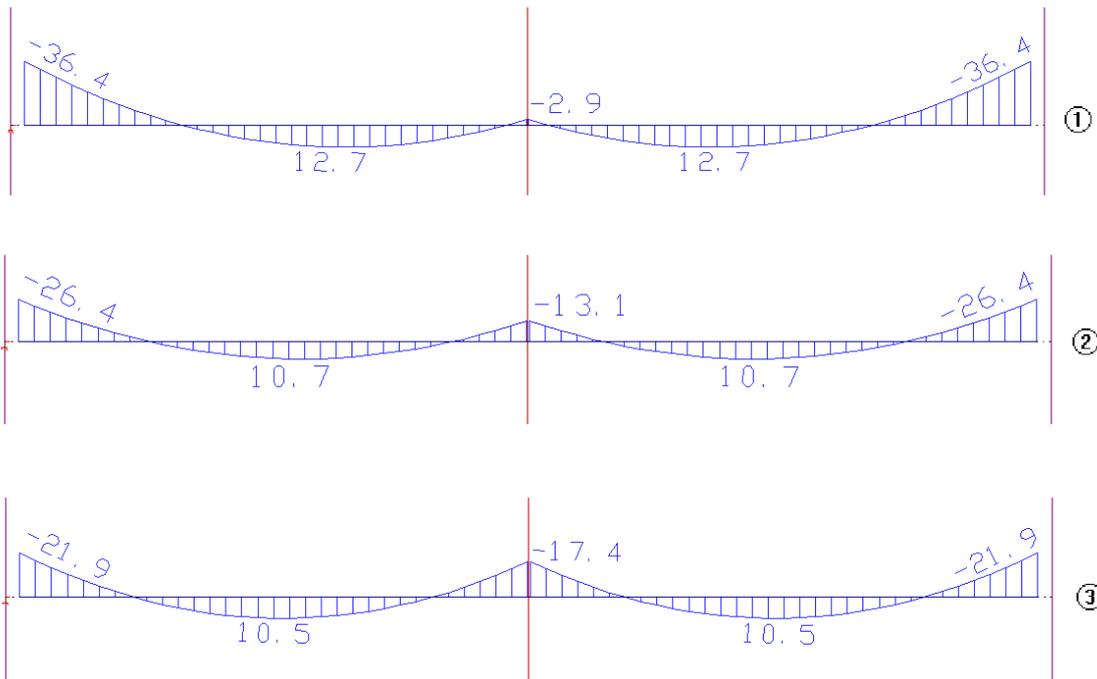
As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos para os três modelos:

Esforço normal (tf) - Pilares			
Ponto	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
A	368,6	332,2	342,1
B	504,4	577,1	557,4

Momento fletor (tf.m) - Vigas			
Ponto	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3

C	-20,8	-19,7	-20,7
D	-18,8	-19,9	-18,7
E	-36,4	-26,4	-21,9
F	-2,9	-13,1	-17,4

Podemos observar que os resultados obtidos pelo modelo TQS com MULAXI e com efeito incremental tem comportamento próximo e adequado ao dimensionamento. A seguir é apresentado o comportamento do diagrama de momento fletor no penúltimo pavimento dos três modelos.



(1) Modelo 1

(2) Modelo 2

(3) Modelo 3

É possível observar que no modelo "elástico" (sem MULAXI) o momento negativo sobre o pilar central é quase nulo, devido a deformação axial deste pilar.

É exatamente o efeito apresentado pelo Modelo 1, onde o momento negativo quase desaparece, que deve-se evitar utilizando ou um modelo elástico com MULAXI ou uma análise estrutural com efeito incremental.

Definição do edifício

Para definir que um edifício será processado com a análise incremental, é necessário acessar os dados do edifício:

1. No Gerenciador do TQS, clique no Botão "Editar Edifício"
2. Na janela "Dados do edifício" Clique na aba "Modelo";
3. Clique no botão "Efeito incremental".
4. Na janela "Análise estrutural com efeito incremental"
5. Ative a opção "Analisar a estrutura considerando efeito incremental";
6. Clique no botão "OK".

Após a ativação da análise incremental, será necessário acessar o arquivo de critérios, para definição do histórico de carregamento e curva "E x tempo".

Critérios de projeto

Para acessar a janela de critérios para o efeito incremental, no Gerenciador:

1. No Gerenciador do TQS, selecione a aba "Sistemas"
2. Clique no botão "Pórtico-TQS" e clique no botão "Critérios"
3. Escolha a opção "Efeito incremental"

, acesse o "Pórtico-TQS" e execute "Editar" - "Critérios" - "Efeito incremental":

Histórico de cargas

Na aba "Histórico de cargas", o engenheiro define como as cargas serão aplicadas na estrutura em suas diversas fases construtivas.

1. Altere o número de dias que representam uma fase construtiva. Apenas útil quando é feita a análise com variação de módulo de elasticidade;
2. Clique no caso de carregamento que deseja alterar;
3. Clique no ícone "...".

Na aba "Edição das parcelas/fases", será necessário editar as parcelas de carga, de modo que estas representem o modo como a estrutura será construída e como as cargas serão aplicadas em cada uma das fases.

1. Clique no botão "Inserir" para inserir uma nova parcela de carga;
2. Clique no botão "Eliminar" para eliminar a parcela selecionada
3. Clique na célula para editar o valor da parcela de carga;
4. Clique na célula para editar a fase construtiva em que a parcela será aplicada;
5. Após finalizar a edição, clique no botão "Salvar".

Após a edição das parcelas de um caso, a tabela será automaticamente atualizada.

De modo geral, é possível fazer a análise incremental de uma estrutura, sem levar em conta a variação do modo de elasticidade do concreto. Para fazer este tipo de análise, basta alterar os dados desta aba.

Diagrama ExT

Na aba "Diagrama ExT", o engenheiro define como será a variação do módulo de elasticidade do concreto com o tempo.

1. Defina se o módulo de elasticidade será fixo ou variável;
2. Caso variável, defina se os dados serão apresentados em função de f_{ck} ou módulo de elasticidade (E);
3. Defina os valores de f_{ck} ou E;
4. Verifique os valores no diagrama.

A transformação entre o f_{ck} e E é feita de acordo com a formulação a seguir:

$$E = f_{ck}^{0,5}, \text{ com } 0 < E < 1 \text{ e } 0 < f_{ck} < 1$$

5. Para finalizar a edição dos critérios de projeto, basta clicar no botão "OK"

Fluência e Retração

A partir da versão v23, é possível considerar os efeitos da fluência e retração do concreto na análise incremental. Na aba "Fluência e Retração", o engenheiro define se os efeitos serão considerados.

1. Defina "Sim" ou "Não" para consideração da retração;
2. Defina "Sim" ou "Não" para consideração da fluência.

Caso os efeitos sejam considerados, o engenheiro pode definir a Idade Final, os parâmetros do Concreto Padrão e quais combinações serão processadas com a análise.

3. Defina a "Idade Final" na caixa de texto;
4. Clique no botão "Parâmetros" para definir os parâmetros do Concreto Padrão;
5. Na janela "Parâmetros do Concreto Padrão", defina os parâmetros nas caixas de texto;
6. Clique em "OK" para salvar;
7. Na tabela de combinações, coluna "Considerar?", defina quais combinações serão processadas com a análise.

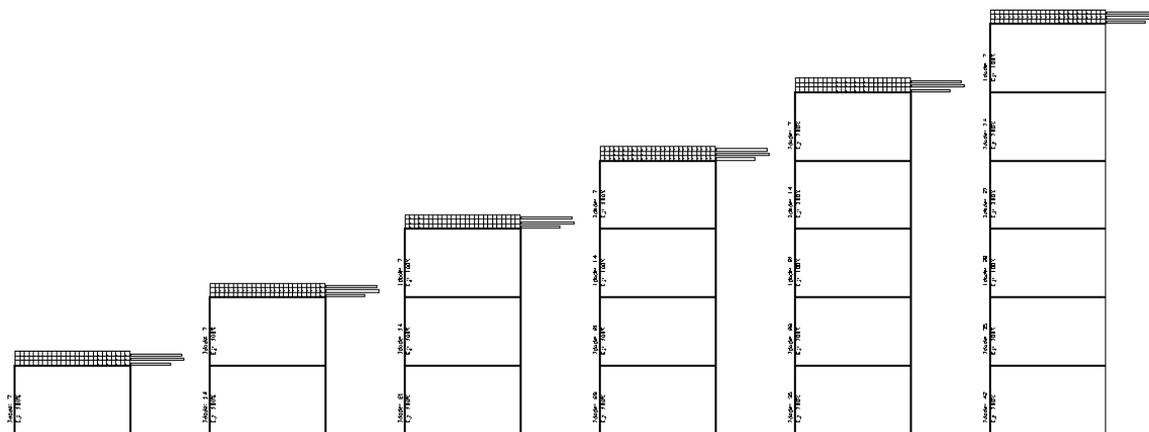
Resultados Intermediários

A partir da versão v23, é possível gravar e visualizar os resultados das etapas intermediárias através do Visualizador de Efeito Incremental. Na aba "Resultados Intermediários", o engenheiro define quais etapas terão os resultados intermediários gravados.

1. Na tabela de etapas, coluna "Gravar?", defina quais etapas terão os resultados gravados.

Desenho de verificação

Após a edição dos critério de projeto, é gerado, dentro da pasta "Espacial" do edifício um desenho esquemática que apresenta as diversas fases construtivas pela qual a estrutura irá passar.



A seguir é apresentado como cada um destes esquemas é apresentado e os dados existentes em cada um deles.

É extremamente importante que o engenheiro responsável pelo projeto verifique se os esquemas apresentados são os esperados para o edifício, uma vez que eles representam exatamente o modo como a análise estrutural será efetuada.

Processamento da estrutura

O processamento da estrutura é feito normalmente através do comando "Processamento global".

Relatório de esforços linear x incremental

Após o processamento da estrutura é possível gerar um relatório com a comparação dos esforços obtidos para dois

casos/combinções de carregamentos.

O primeiro caso/combinção utilizado é o caso de número 1, cujo nome é "Todas permanentes e acidentais dos pavimentos". Para este caso de carregamento, o processamento com efeito incremental não é feito; deste modo temos os resultados de um processamento linear.

O segundo caso/combinção utilizado é a primeira combinação com todos os casos de carga vertical. A diferença desta combinação para o caso 1 é que o processamento de efeito incremental será feito.

Esta comparação tem o objetivo de apresentar ao engenheiro as diferenças entre o processamento um linear e um processamento com efeito incremental. Deste modo, o engenheiro tem mais uma ferramenta para análise da sua estrutura.

Geração do relatório

Para gerar o relatório comparativo, após o processamento global:

1. No Gerenciador do TQS, selecione a aba "Sistemas" e clique no botão "Pórtico-TQS"
2. Com a aba do "pórtico-TQS" selecionada, clique em visualizar "Relatórios"
3. Escolha a opção "Efeito incremental". O relatório será apresentado:

Através deste relatório é possível observar os pilares que mais "receberam" ou "perderam" cargas devido à análise incremental.

Esforços de dimensionamento

O dimensionamento dos elementos estruturais é feito normalmente, considerando as combinações de cálculo (que levam em conta o efeito incremental).

Bibliografia

Existe uma série de teses e dissertações que abordam o modo como o efeito incremental foi implementado nos Sistemas TQS. A seguir são apresentadas algumas das referências utilizadas durante nossos estudos e implementação.

Análise incremental construtiva de edificações

Kripka, M.

Dissertação de mestrado, 1990

Orientador: Soriano, H. L.

Análise incremental construtiva de edifícios metálicos de andares múltiplos usando o método dos elementos finitos

Gorza, L. S.

Dissertação de mestrado, 2000

Orientador: Coelho, L. H.

Estruturas de edifícios em concreto armado submetidas a ações de construção

Prado, J. F. M. A.

Tese de doutorado, 1999

Orientador: Corrêa, M. R. S.

Situações críticas no projeto de edifícios de concreto armado submetidos a ações de construção

Alexandre Alves de Freitas

Dissertação de mestrado, 2004

Orientador: Corrêa, M. R.

Consideração do processo incremental construtivo no projeto estrutural de edifícios

Seixas, E., Sgarbi M., Souza, P. V.

Trabalho apresentado no III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2010