

e-Cross

Ferramenta Gráfica para Ensino do Processo de Cross

Versão 1.01 – Junho de 2000*

Autores:

Luiz Fernando Martha

(Professor de Análise de Estruturas)

André Cahn Nunes

(Aluno de Engenharia Civil, bolsista de Iniciação Científica do CNPq)

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Departamento de Engenharia Civil e

Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica – Tecgraf/PUC-Rio

Introdução

O Processo de Cross (ou Método da Distribuição de Momentos) é um método relativamente simples para o cálculo de momentos fletores em vigas contínuas, pórticos planos, grelhas e até em pórticos espaciais. Este método só se aplica para estruturas sem deslocabilidades externas (do tipo translação), isto é, ele só se aplica a estruturas com barras inextensíveis e que só tenham deslocabilidades do tipo rotação. Apesar desta limitação, o método criado por Hardy Cross na década de 1930 ("Analysis of Continuous Frames by Distributing Fixed-End Moments," *Transactions*, ASCE, Paper no. 1793, vol. 96, 1936) ainda é utilizado hoje para o cálculo de estruturas. O Método da Distribuição de Momentos tem também um objetivo acadêmico, pois serve como introdução ao Método dos Deslocamentos, que é o método atualmente mais utilizado para a análise de estruturas formadas por barras.

Este manual descreve uma ferramenta gráfica, chamada *e-Cross*, para o ensino do Processo de Cross. Este programa tem por objetivo demonstrar aos usuários, alunos de Graduação em Engenharia Civil, como o Processo de Cross funciona para o caso de vigas contínuas. A execução do programa evidencia a interpretação física do Método da Distribuição de Momentos, mostrando como a configuração deformada da viga e o diagrama e momentos fletores variam durante a solução iterativa do método. O programa também mostra os cálculos da mesma forma que são feitos em uma solução manual, fazendo uma associação com a interpretação física.

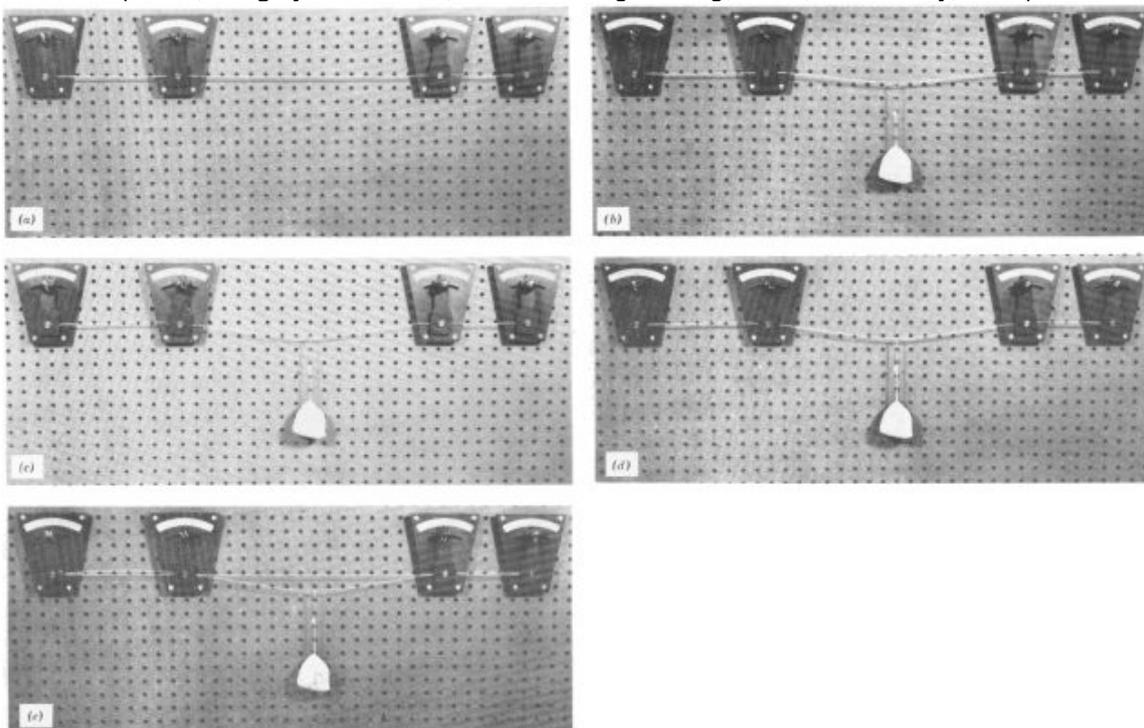
As principais vantagens do programa *e-Cross* são oriundas da linguagem de programação utilizada: *Java*. Esta foi escolhida por permitir a execução do programa em modo *on-line* pela Internet, ou em modo *off-line*, após *download* do programa e do ambiente *JRE* (*Java Runtime Environment*). O programa pode ser obtido através do endereço URL: <https://www.tecgraf.puc-rio.br/etools/cross>. Outra vantagem da linguagem *Java* é que ela é baseada no paradigma de Programação Orientada a Objetos, permitindo a reutilização do código de uma maneira bastante natural.

O programa *e-Cross* é uma ferramenta educativa para ser utilizada durante as aulas de Análise Estrutural de qualquer curso de Engenharia Civil, quando se leciona o Processo de Cross. O alunos também podem acessar o programa de suas próprias casas, facilitando bastante o aprendizado do método. O fácil acesso também possibilita a utilização do programa para cálculo de vigas contínuas, sempre útil para o projeto de estruturas.

Motivação

O desenvolvimento desta ferramenta educacional foi motivado pelo excelente livro texto de autoria de Richard White, Peter Gergely e Robert Sexsmith da Universidade de Cornell: *Structural Engineering*, vol. 2, John Wiley, 1976. O livro explica o Método da Distribuição de Momentos com auxílio de um experimento físico mostrado na figura abaixo (que foi copiada do livro). O programa *e-Cross* pode ser visto como uma versão virtual deste experimento.

Experimento físico para simulação do Processo de Cross
(White, Gergely e Sexsmith, *Structural Engineering*, vol. 2, John Wiley, 1976).



Instalação

Instalação do ambiente Java

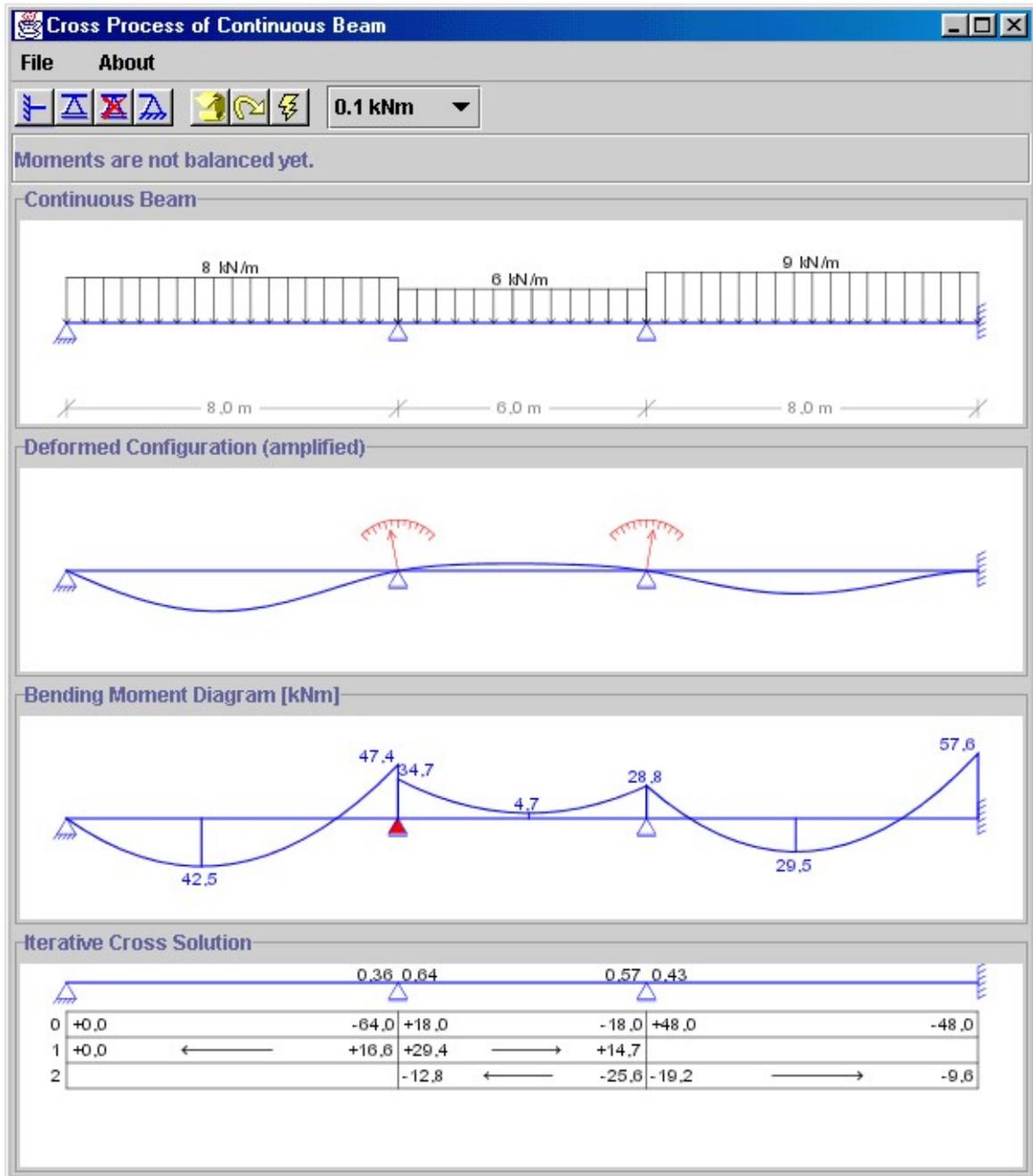
O programa *e-Cross* foi desenvolvido em Java. Esta linguagem possibilita a execução do programa em modo *on-line* pela Internet, ou em modo *off-line*, após *download* do programa e do ambiente *JRE* (*Java Runtime Environment*). O arquivo para instalação do *JRE* pode ser obtido no endereço URL <https://www.java.com/download/manual.jsp>. A versão *on-line* (*applet*) precisa da instalação da extensão *CheerpJ Applet Runner* no navegador (URL <https://cheerpj.com/cheerpj-applet-runner>).

Instalação do programa *e-Cross off-line*

O programa *e-Cross*, versão *off-line*, pode ser conseguido via FTP no endereço URL https://www.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/cross1_0_1.jar. Após a instalação do ambiente *JRE* e de fazer *download* do *e-Cross* basta clicar duas vezes com o mouse no arquivo "cross1_0_1.jar" para executá-lo. A diferença para a versão *on-line* é que na versão *off-line* é possível salvar e abrir modelos de viga contínua em arquivo no disco rígido local do usuário. A extensão padrão utilizada para este arquivo é ".crs".

Tela Principal

A interface gráfica do programa e-Cross, mostrada na figura abaixo, possui um menu em cascata (*drop-down*) no topo, uma barra de controle (*tool bar*), uma linha de mensagens e quatro grandes janelas, que são chamadas de *canvas* (comparação com as telas brancas usadas pelos pintores para fazer seus quadros). São nestes *canvases* que serão "pintados" os modelos estruturais, seus diagramas e seus resultados.



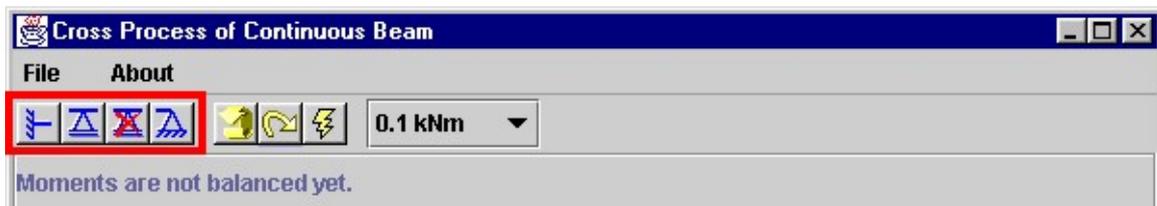
Menu *File*

O menu *File* do topo da interface gráfica contém opções para abrir um arquivo de uma estrutura, salvar a estrutura corrente, ou finalizar a execução do programa. Deve ser observado que na versão *on-line* do programa (via *browser* da Internet) não existem as opções para salvar ou abrir um arquivo. Estas só aparecem na versão *off-line*. O modelo da estrutura é salvo em arquivo com formato do tipo texto comum. A extensão ".crs" é adotada como padrão para os arquivos do programa.



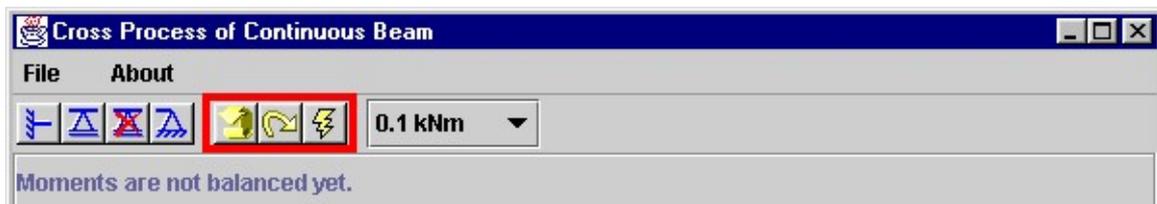
Edição de Suportes

A barra de controle, mostrada na figura abaixo, contém comandos para modelagem da viga contínua e para controle da simulação. Os quatro botões do primeiro grupo, salientado na figura, permitem a edição e a modificação da estrutura. O primeiro botão e o quarto botão trocam os tipos de apoios extremos de apoio simples para engastado, ou vice-versa. O segundo e o terceiro botão permitem a inclusão e remoção de apoios internos, respectivamente.



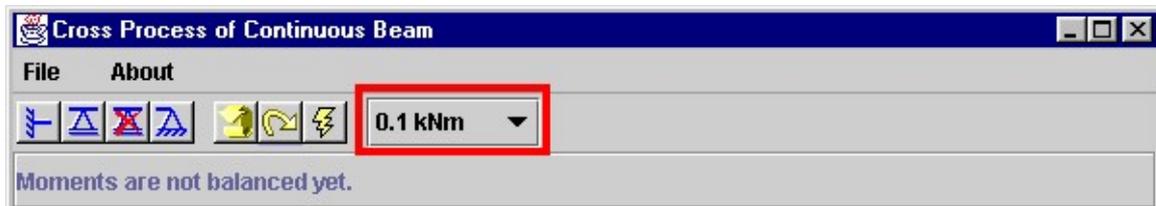
Controle da Iteração

O controle da simulação iterativa do Processo de Cross é feito pelos três botões do segundo grupo da barra de controle, mostrado na figura abaixo. O primeiro botão do grupo retorna o processo para o início, o que corresponde à situação de engastamento perfeito de todos os nós internos. O segundo botão do grupo permite a execução do processo passo a passo: o próximo nó a ser equilibrado é o que tiver o maior valor em módulo para o desequilíbrio de momentos fletores. O terceiro botão do grupo aciona a resolução automática do processo até a convergência final.



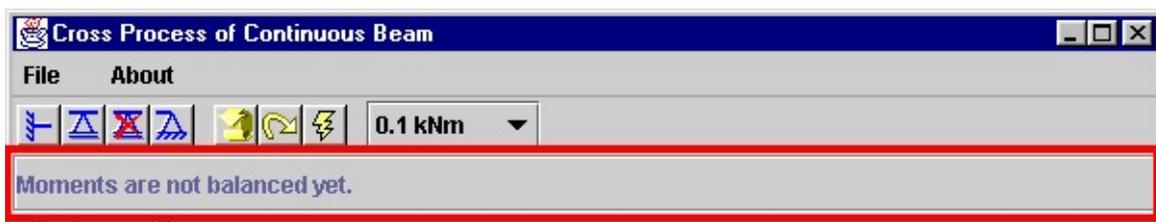
Precisão de Momentos

Também existe uma opção na barra de controle para especificação da precisão numérica a ser utilizada. Isso é feito através da modificação do número de casas decimais para momentos fletores, conforme indicado na figura abaixo.



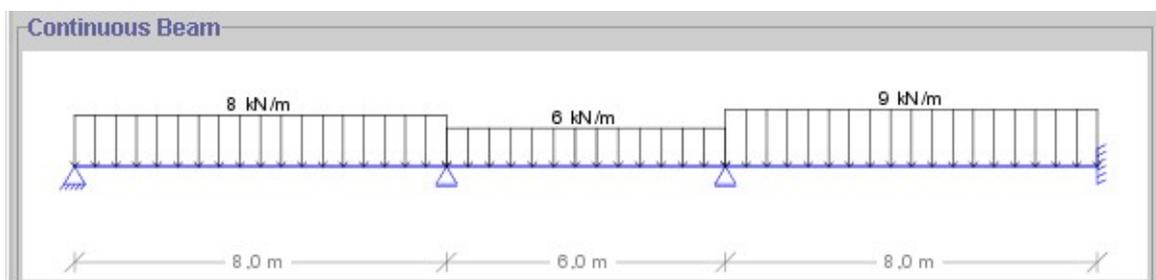
Linha de Mensagens

Abaixo da barra de controle existe uma área de mensagens do programa ao usuário, mostrada na figura abaixo. As mensagens direcionam a execução do programa, como por exemplo a mensagem "Moments are not balanced yet", que indica que o processo ainda não convergiu, isto é, ainda existem momentos fletores a serem equilibrados. Quando a solução iterativa de uma estrutura converge, o programa notifica o usuário através da mensagem "Cross solution performed".



Canvas de Modelagem

A primeira grande área branca da interface gráfica do programa, ou melhor, o primeiro *canvas* é utilizado para mostrar o modelo estrutural e os carregamentos (somente uma carga uniformemente distribuída é considerada por vão). Este *canvas*, mostrado na figura abaixo, também tem como função permitir a manipulação da estrutura. Isto significa que o usuário pode adicionar ou remover apoios internos (após acionamento da opção correspondente na barra de controle), pode mover apoios horizontalmente, alterando as dimensões dos vãos, ou pode variar o valor do carregamento em cada vão. Qualquer modificação feita na estrutura no *canvas* de modelagem automaticamente reinicializa a iterações do processo. Isto vai afetar a imagens nos outros três *canvases*.

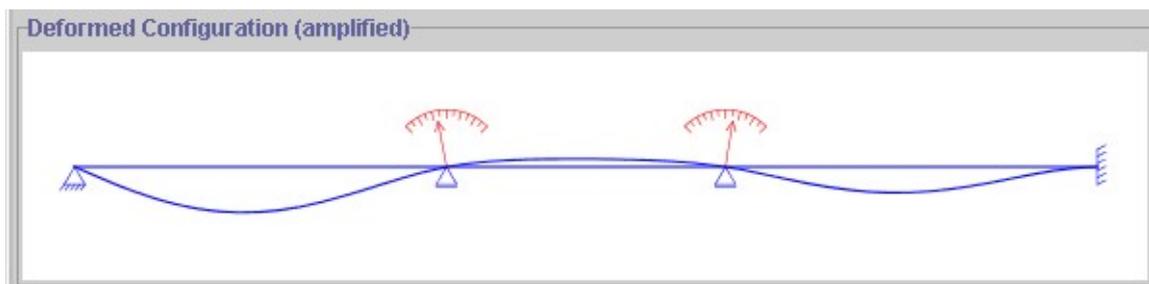


O processo de modelagem é feito por manipulação direta do usuário, que altera a estrutura de uma forma bastante intuitiva, sempre utilizando o *mouse*. Por exemplo, para mover um apoio basta *clique* o *mouse* em cima do apoio desejado e arrastá-lo para a sua nova posição. Os comprimentos dos vãos adjacentes ao nó (que são desenhados no *canvas* de modelagem) vão se alterando à medida que o apoio vai sendo arrastado. Procedimento semelhante é feito para alterar o carregamento de um vão: a carga é arrastada na direção vertical, modificando o seu valor e o seu tamanho no desenho. Com isso fica muito simples criar novas estruturas e modificá-las. Esta facilidade e rapidez

de modelagem é o ponto chave do processo educacional pretendido pelo programa: o estudante tem a oportunidade de testar várias alternativas e o programa mostra os passos iterativos que vão ocorrendo durante a solução do Processo de Cross.

Canvas da Deformada

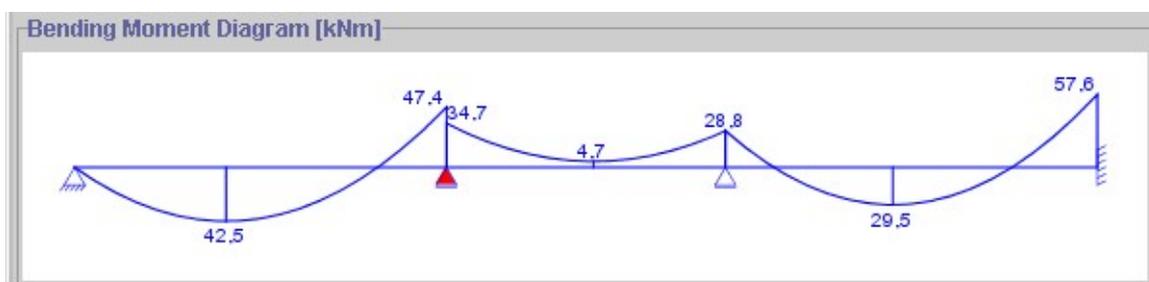
O segundo *canvas* mostra a configuração deformada da estrutura após a resolução total ou parcial do processo, tal como mostrado na figura abaixo. Isto significa que a deformada vai sendo alterada ao longo do processo. No início do processo, isto é, no início da execução do programa, ou quando qualquer edição da viga contínua é feita no *canvas* de modelagem, a configuração deformada corresponde à situação de engastamento perfeito de todos os nós internos. Neste caso todos as seções da viga contínua nos apoios internos têm rotações zeradas.



Existem potenciômetros em cada nó interno da estrutura que representam a rotação da viga nestes nós. Esta rotação vem do próprio Processo de Cross que é, em linhas gerais, uma questão de travar a rotação de todos nós, liberando apenas a rotação do nó a ser equilibrado em cada passo. Quando é permitida a rotação de um nó, este se equilibra através de parcelas de momentos fletores equilibrantes nas barras adjacentes. Como consequência do giro do nó e do seu equilíbrio, as barras adjacentes ao nó se deformam e têm seus momentos fletores alterados. Isto é, novos momentos fletores desequilibrantes são "transmitidos" para os nós adjacentes. O processo converge pois os incrementos de rotação vão diminuindo a cada passo, assim como as parcelas de momentos fletores transmitidas.

Canvas de Momentos

O terceiro *canvas* apresenta o diagrama de momentos fletores em cada estágio do processo, como na figura abaixo. Antes do processo iniciar, o diagrama de momentos fletores corresponde à situação de engastamento perfeito de todos os nós internos. É de grande importância para a compreensão do processo que se mostre este diagrama. Isto vai permitir a visualização dos momentos desequilibrantes em cada estágio do processo. Estes são facilmente percebidos ao olhar para os nós e visualizar uma descontinuidade no diagrama de momentos fletores.



Uma característica interessante deste *canvas* é que os apoios são pintados de vermelho quando o nó se encontra em desequilíbrio. Isto facilita a percepção dos nós desequilibrados, principalmente quando o desequilíbrio de momentos fletores é pequeno. Estes apoios coloridos de vermelho possuem uma função de grande importância: servirão de interface do usuário com a simulação. Isto significa que quando o usuário *clica* em um apoio pintado ocorrerá um passo no processo e este nó ficará equilibrado.

Esta possibilidade de o usuário escolher qual o nó que irá ser equilibrado é uma das chaves para o aprendizado. A explicação é muito simples, pois se em cada passo os nós mais desequilibrados forem *clikados* o número de interações será mínimo. Quer dizer que a convergência será mais rápida. A possibilidade de escolha do nó a ser equilibrado permite que o aluno aprenda realmente o comportamento do Processo de Cross.

Canvas da Solução

O quarto *canvas*, mostrado abaixo, tem como função mostrar os resultados de cada passo do Processo de Cross. Isto é feito na forma em que estes resultados são usualmente colocados quando se calcula manualmente uma viga contínua pelo processo. Isto é, os resultados têm um formato de uma tabela. Esta tabela de respostas pode ser facilmente lida pelos alunos, pois possui um formato idêntico àquele que eles fazem em seus cadernos.

The screenshot shows a beam with three supports. The first support is a pin support, and the last is a roller support. The beam is divided into three segments by two internal supports. The coefficients of distribution are shown above the beam: 0.36 and 0.64 for the first internal support, and 0.57 and 0.43 for the second internal support. Below the beam is a table with three rows representing iterations 0, 1, and 2. The table shows moments at the ends of the beam and at the internal supports, with arrows indicating the direction of the moments.

	0.36	0.64	0.57	0.43		
0	+0.0	-64.0	+18.0	-18.0	+48.0	-48.0
1	+0.0	+16.6	+29.4	+14.7		
2		-12.8	-25.6	-19.2		-9.6

Neste *canvas*, os *coeficientes de distribuição de momentos* para o equilíbrio de cada nó são mostrados adjacentes a cada apoio interno. Estes coeficientes indicam a parcela de momento equilibrante que vai para cada seção de viga adjacente ao nó. Por isso a soma dos dois coeficientes em cada apoio interno é unitária. Os valores destes coeficientes são proporcionais à rigidez de rotação do nó em relação às duas barras adjacentes.

A tabela de resultados mostrada no *canvas* da solução iterativa contém uma linha para cada iteração do processo. A primeira linha sempre corresponde aos momentos fletores iniciais na situação de engastamento perfeito de todas as seções dos apoios internos. As linhas seguintes mostram, para cada iteração do processo, as parcelas de momentos equilibrantes do nó equilibrado e as parcelas transmitidas aos nós adjacentes. Os momentos fletores que aparecem na tabela seguem a seguinte convenção de sinais: quando o momento atuante na extremidade de uma barra for no sentido anti-horário o seu sinal é positivo; caso contrário o sinal é negativo.

A tabela de resultados, por possuir mais linhas do que o *canvas* pode mostrar, pode subir ou descer na tela simplesmente *clikando* em cima dela e arrastando-a com o *mouse*.