

## ENSAIOS DE STUTTGART – REPRODUÇÃO EM LABORATÓRIO

Andrea Corrêa Rocha (1); Maria das Graças Duarte Oliveira (1); Paulo Sérgio Oliveira Resende (1); Alberto Vilela Chaer (2)

(1) Acadêmicos de Engenharia Civil, Universidade Católica de Goiás  
email: [ledeia@zaz.com.br](mailto:ledeia@zaz.com.br) ; [duartoliveira@uol.com.br](mailto:duartoliveira@uol.com.br); [pauloresende@pop.com.br](mailto:pauloresende@pop.com.br)

(2) Professor M.Sc., Departamento de Engenharia  
Universidade Católica de Goiás  
email: [chaer@ucg.br](mailto:chaer@ucg.br)

Av. Universitária, 1440 – St. Universitário – 74.605-010 – Goiânia – GO

*Palavras Chaves: Concreto Armado, Mecanismos de Ruptura, Ensaios de Stuttgart.*

### Resumo

Os “Ensaios de Stuttgart” realizados na Alemanha, no início do século passado, pelos pesquisadores Leonhardt e Walther são um marco histórico para o desenvolvimento do estudo teórico do Concreto Armado.

Seus resultados comprovaram experimentalmente a primeira teoria cientificamente consistente, que são as idéias fundamentais de Mörsch (Teoria Clássica de Mörsch) e, em seguida, surgem as primeiras redações de normas para o cálculo e construção em concreto armado, o que fez com que a utilização deste material iniciasse a conquista de um mercado em todo o mundo. Conseqüentemente, os estudos do Concreto Armado (dimensionamento, detalhamento e execução) foram amplamente explorados, gerando prescrições e recomendações cada vez mais precisas e melhor elaboradas, em função dos avanços que a evolução tecnológica tem propiciado para o homem.

Com o objetivo de reproduzir este experimento nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia da Universidade Católica de Goiás, a partir de uma Viga de Referência, foram moldadas várias vigas de seção retangular em Concreto Armado, onde se variaram as armaduras de flexão e cisalhamento, com o arranjo e direcionamento das barras, enrijecendo e/ou fragilizando trechos das vigas, de modo a permitir o desenvolvimento de diferentes situações de ruptura, para a observação, análise e compreensão do comportamento de vigas de seção retangular em Concreto Armado, em função das condições de detalhamento das armaduras longitudinal e transversal.

Os ensaios propiciaram a verificação dos seguintes mecanismos de ruptura: Tração na Flexão Pura, Tração por Cisalhamento na Flexão Simples, Compressão por Cisalhamento na Flexão Simples e Deslizamento de Armadura por Deficiência de Comprimento de Ancoragem.

O resultado desta pesquisa constitui-se parte do material didático da Disciplina Estruturas de Concreto Armado I, facilitando aos acadêmicos a compreensão dos Modelos de Ruptura de Vigas de Seção Retangular, bem como auxiliando no aprendizado de posicionamento de Armaduras de Flexão e Cisalhamento.

## 1 Histórico

A partir de 1867, Monier obteve patentes para a construção de tubos, lajes e pontes, tendo êxito na execução de diversas obras em concreto armado, mesmo sem qualquer fundamentação científica, por métodos puramente empíricos.

Anos depois, em 1902, E. Mörsch elabora os primeiros textos teóricos sobre comportamento estrutural de peças em concreto armado, com especial enfoque para vigas prismáticas de seção retangular.

Após a compra dos direitos, pela Alemanha, da patente Monier, a empresa – que futuramente seria mundialmente conhecida por “Wayss & Freitag” – passou a impulsionar os primeiros ensaios de laboratório em peças de concreto armado.

Estes experimentos foram realizados inicialmente pelos pesquisadores Leonhardt e Walther, o que ficou conhecido como “Ensaio de Stuttgart”.

Com os resultados dos “Ensaio de Stuttgart”, comprovou-se experimentalmente a primeira teoria cientificamente consistente, que são as idéias fundamentais de Mörsch (Teoria Clássica de Mörsch) e, logo em seguida, surgem as primeiras redações de normas para o cálculo e construção em concreto armado, o que fez com que a utilização deste material iniciasse a conquista de um mercado em todo o mundo.

Conseqüentemente, os estudos do Concreto Armado (dimensionamento, detalhamento e execução) foram amplamente explorados, gerando prescrições e recomendações cada vez mais precisas e melhor elaboradas, em função dos avanços que a evolução tecnológica tem propiciado para o homem.

Devemos, portanto, enaltecer todos os pesquisadores que têm se dedicado ao estudo do Concreto Armado, sem nos esquecer, jamais, que tudo se iniciou com a simplicidade dos “Ensaio de Stuttgart”, um marco para a história do Concreto Armado, nestes últimos 100 anos.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Modelo Experimental

#### 2.1.1 Idealização estrutural

Seja uma viga de seção retangular biapoada, conforme esquematização, figura 1.

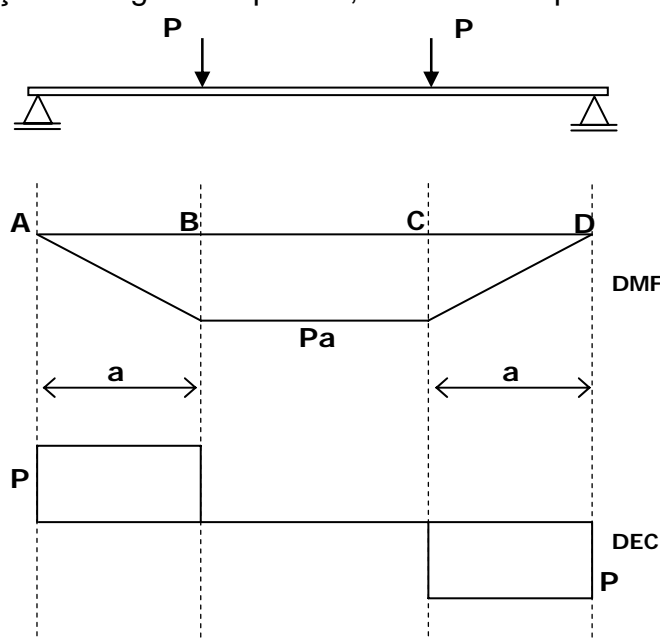


Figura 1 – Idealização estrutural. Diagramas de Momento Fletor e Esforço Cortante

O ensaio consiste no carregamento gradativo de uma viga retangular biapoiada (convenientemente dimensionada pela teoria clássica de Morsch), com duas cargas concentradas simétricas.

O carregamento é aumentado até que venha a atingir o valor que leve a viga à ruptura, permitindo, numa mesma peça, a observação da **flexão pura** (sem a presença do cisalhamento) no trecho BC e da **flexão simples** (com a presença do cisalhamento) nos trechos AB e CD.

### 2.1.2 Trajetória das tensões principais

Num primeiro estágio de carregamento, a viga não apresenta fissuras, pois o concreto da fibra inferior não atingiu a tensão de ruptura à tração. Os pontos da peça não fissurada estão sob estado plano de tensões, com as trajetórias de tensões principais de tração e de compressão esquematizadas na figura 2.

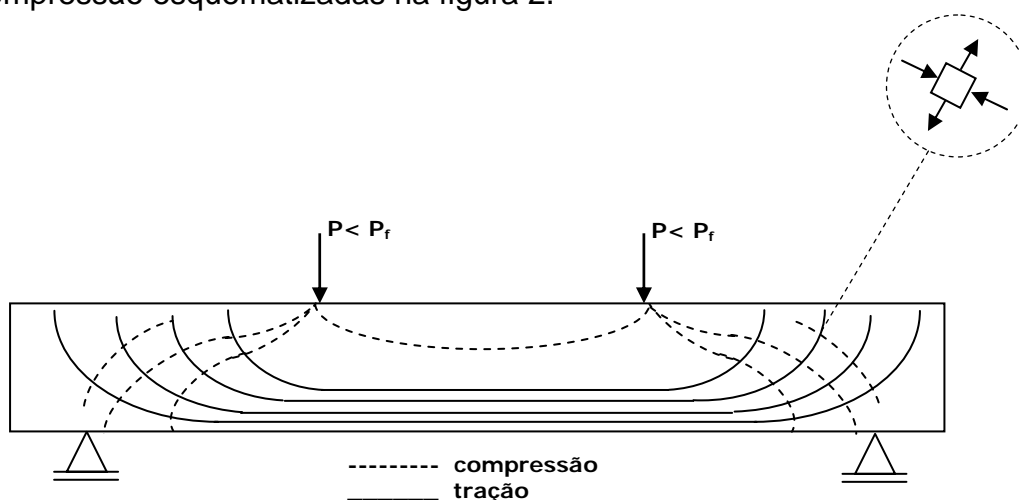


Figura 2 – Trajetória das Tensões Principais – Estádio I

### 2.1.3 Panorama de fissuração

Com o aumento da carga, a tensão de ruptura à tração é atingida no trecho central e começam a aparecer as primeiras fissuras verticais que se estendem até pouco abaixo da linha neutra. Nesta fase os esforços de tração são absorvidos pela armadura. No início deste estágio, nos trechos extremos o concreto não atinge a tensão de ruptura, mas o aumento progressivo da carga, até o colapso, forçará toda a viga a trabalhar fissurada, com exceção de regiões muito pequenas, próximas aos apoios. Neste trecho, em presença das tensões cisalhantes, as fissuras são inclinadas, figura 3.

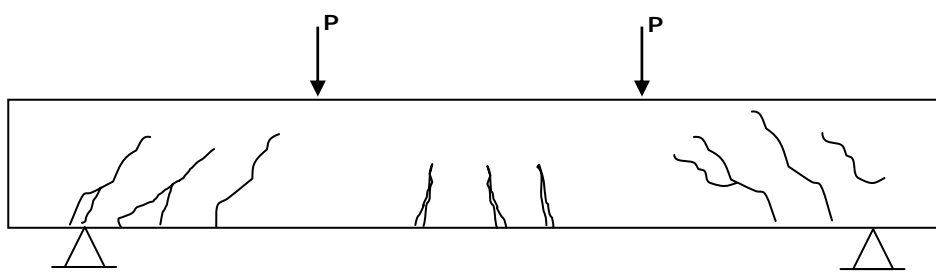


Figura 3 – Fissuras Verticais (Flexão Pura) – Fissuras Inclinadas (Flexão Simples) – Estádio II

O panorama de fissuração da peça ao atingir o estado limite último pode ser muito diferente daquele que poderia se prever da análise das trajetórias de tensões elásticas, pois depende do arranjo para a distribuição das armaduras (figura 4).

## **2.2 Modelo de Treliça**

### **2.2.1 Arranjo de armadura**

Em princípio existiriam duas possibilidades para o arranjo das armaduras.

Uma primeira, teoricamente possível, é baseada na idéia da substituição local de material, onde barras de armadura seriam distribuídas por todo volume da peça estrutural, de modo que ao se abrir uma fissura já existiria uma armadura capaz de absorver a tração liberada do concreto. Neste caso, a distribuição dos esforços internos seguiria o mesmo padrão de antes da fissuração. Porém, nada garante que este arranjo seja o mais eficiente para a segurança em relação aos estados limites e nem o mais econômico.

A segunda baseia-se no fato de que uma parte das barras de aço é mais bem aproveitada quando empregada de forma concentrada, em posições preferenciais da estrutura. Este é o princípio dos arranjos de armaduras padronizadas, estabelecidas de acordo com modelos nos estados limites últimos das peças estruturais. Estes modelos devem sempre garantir a estabilidade, global e local, da peça.

### **2.2.2 Treliça de Mörsch**

Para o trecho central da viga, onde as seções transversais estão solicitadas à flexão pura, o modelo típico consiste de seções resistentes formadas por um banzo comprimido de concreto e um banzo tracionado correspondente à armadura longitudinal disposta junto à face inferior. Para os trechos extremos, sob flexão simples, o modelo idealizado é o de uma treliça, que considera a interação entre o momento fletor e a força cortante. A treliça tem banzos longitudinais, comprimidos e tracionados, como no trecho central, ligados por diagonais comprimidas e tirantes. As diagonais comprimidas, ditas bielas, representam o concreto entre as fissuras. Os tirantes, verticais ou inclinados, representam a armadura transversal da viga, completando o esquema estático da treliça e costurando as fissuras, figura 4.

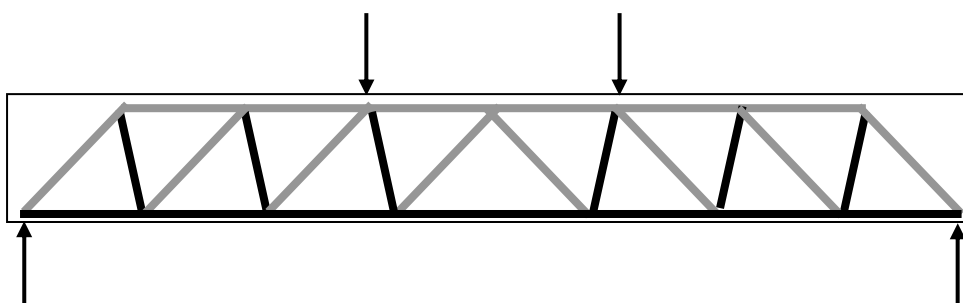


Figura 4 – Treliça de Mörsch

## **3 Modelos de Ruptura**

Segundo SÜSSEKIND (1985), podemos relacionar vários tipos de ruptura possíveis de ocorrerem, figura 5.

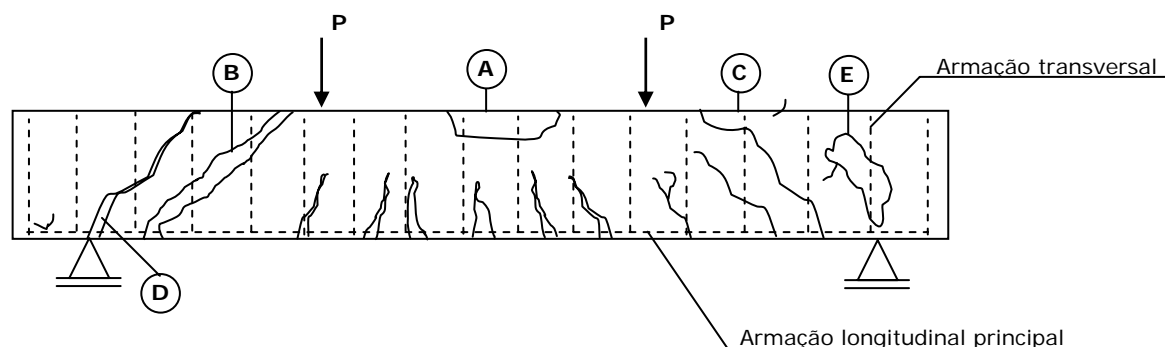


Figura 5 – Modelos de Ruptura (SÜSSEKIND (1895))

### 3.1 Ruptura por flexão – região A

#### 3.1.1 Vigas subarmadas

Concreto dimensionado por excesso. O processo de ruptura se inicia pelo aço, ao ultrapassar seu limite de escoamento. Grande acréscimo de deformação na fibra tracionada. Diminuição da área comprimida, até que a mesma entra em processo de ruptura por excesso de compressão.

#### 3.1.2 Vigas superarmadas

Armadura dimensionada em excesso. A ruptura se dará, diretamente, pelo esmagamento das fibras comprimidas de concreto. O colapso da peça se dará antes que o aço das fibras tracionadas tenha entrado em escoamento. Não será antecedida de grandes deformações, sendo chamada “**Ruptura sem aviso prévio**”.

### 3.2 Ruptura de cisalhamento, por tração – região B

É o tipo mais comum de ruptura por cisalhamento, resultante da deficiência na armadura transversal destinada a absorver as trações que surgem por influência dos esforços cortantes. A peça tende a se dividir em duas partes, ficando caracterizada uma linha borda a borda.

### 3.3 Ruptura por compressão da mesa devido ao esforço cortante – região C

A deficiência de armadura transversal de tração, além da ruptura típica de tração (armadura de cisalhamento insuficiente) pode ocorrer uma ruptura por compressão na mesa superior. Ruptura esta explicável pelo fato de que sendo baixa a armadura de cisalhamento o aço atinge logo o limite de escoamento. O que acarreta intensa fissuração do concreto (fissuras inclinadas) ao longo de seu comprimento, penetrando as fissuras na região da mesa comprimida pela flexão que assim debilitada, pode entrar em processo de ruptura por esmagamento do concreto, apesar de a seção a que pertence estar submetida a momento fletor inferior àquele que atua no meio do vão da viga.

### 3.4 Ruptura por ancoragem deficiente da armadura principal (longitudinal) – região D

Armadura principal de tração da viga está solicitada sobre o apoio (onde teoricamente se pensaria em solicitação nula), de modo que precisa ser convenientemente ancorada, sob

pena de ocorrência de um tipo de ruptura em que a peça entra bruscamente em colapso devido a um deslizamento da armadura longitudinal, usualmente se propagando e provocando também uma ruptura ao longo da altura da viga.

### 3.5 Ruptura de cisalhamento, por esmagamento da biela comprimida – região E

Larguras  $b_w$  muito reduzidas, face às solicitações atuantes, as tensões principais de compressão poderão atingir valores excessivamente elevados, incompatíveis com a capacidade de resistência do concreto por compressão, quando solicitado simultaneamente por tração perpendicular (estado duplo). Teremos, então, uma ruptura por esmagamento de concreto (como se houvesse um pilar inclinado no interior da viga).

## 4 Ensaios experimentais

Para se reproduzir os Ensaios de Stuttgart, de acordo com as condições oferecidas pelo Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia da UCG, optou-se por utilizar formas metálicas padrão existentes e as adaptações da prensa universal para carregamento em dois pontos de aplicação e os apoios das vigas, de acordo com os dispositivos apropriados, em dois pontos simétricos. A seguir, mostramos as etapas de preparação das peças, ensaios e resultados.

### 4.1 Detalhamento da Viga de Referência

A figura 6 mostra o detalhamento da Viga de Referência, a ser moldada em forma metálica padrão de 75cm de comprimento, com seção quadrada de lado 15cm.

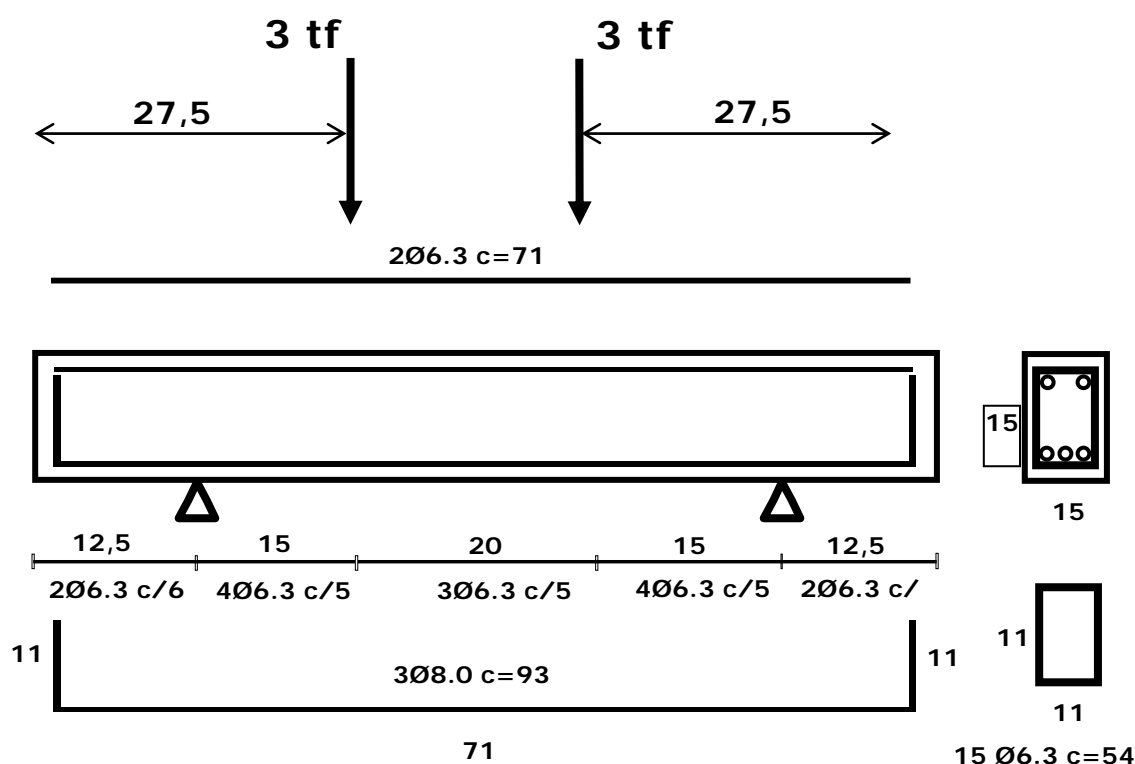


Figura 6 – Viga de Referência - detalhamento

## 4.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a produção do concreto (agregados e cimento), bem como o aço empregado são apresentados na tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais

Materiais		BRITA 1		BRITA 2		AREIA	
D.M.C. (mm)		19,0		25,0		2,4	
Massa Unitária (Kg/dm³)		1,46		1,46		1,44	
Massa Específica (Kg/dm³)		2,79		2,79		2,63	
M.F.		6,80		7,47		2,70	
CIMENTO							
Massa específica (g/cm³)	Resíduo na peneira nº 200 (%)	Área específica (cm²/g)	Tempo de pega (h:min)		Resistência à compressão (MPa)		
			Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias
3,01	1,0	4160	2:20	3:50	13,2	26,6	37,2
AÇO							
Amostra N.º	Diâmetro (mm)	Categoria	Limite de escoamento (Mpa)		Limite de resistência (Mpa)		Alongamento (%)
01	6,3	CA - 50	580		930		12,3
02	8,0		550		900		14,7
03	16,0		580		950		11,2

### **4.3 Condição de apoio e aplicação do carregamento**

As fotos 1 e 2 ilustram a colocação da viga para ser ensaiada, bem como a condição de apoio em dois pontos e aplicação de carregamento simétrico, também em dois pontos.

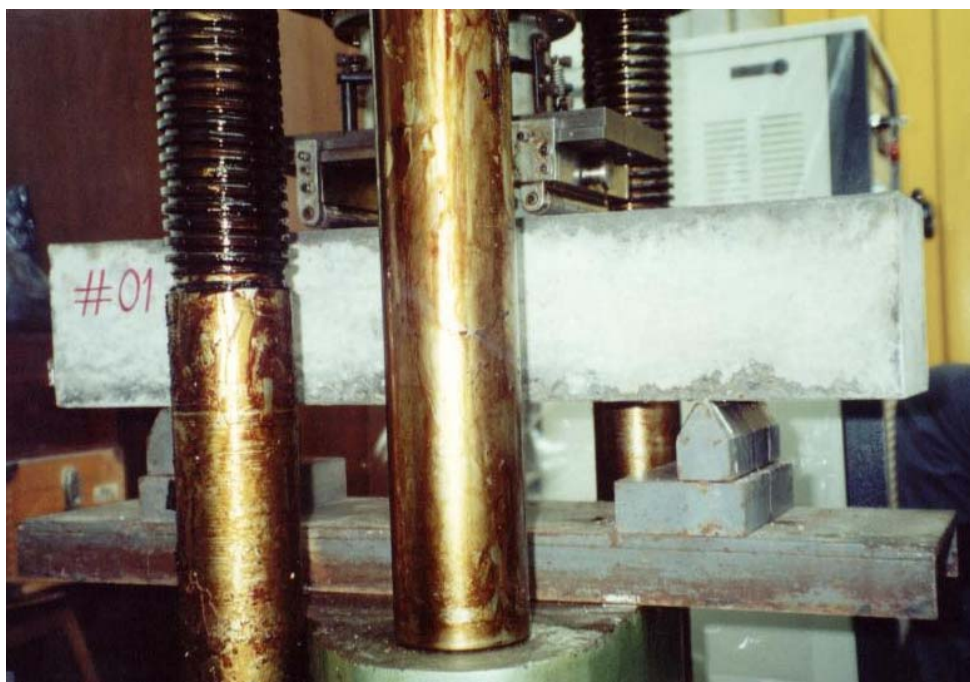


Foto 1 – Viga posicionada na prensa



Foto 2 – Apoio – Aplicação de Carregamento

## **5 Modelos de ruptura**



## 5.1 Ruptura por tração na Flexão Pura

### 5.1.1 Armadura para modelo de ruptura – região A

Armadura de Flexão fragilizada, para permitir a **Ruptura por Tração na Flexão Pura**.

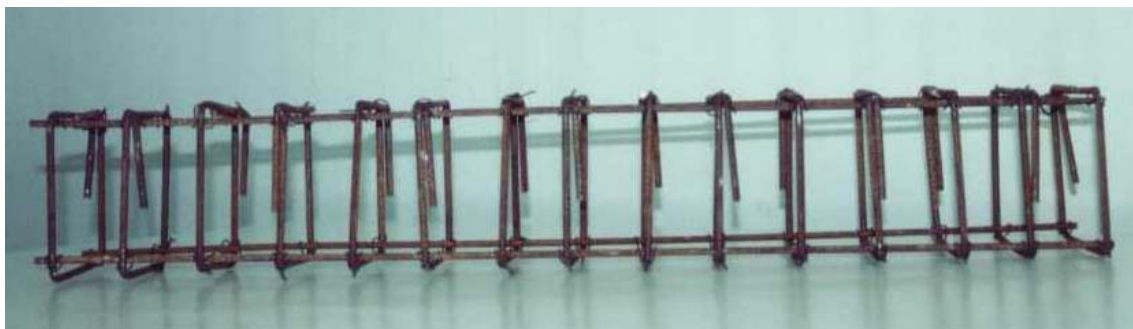


Foto 3 – Armadura para ruptura – região A

### 5.1.2 Viga Ensaada



Foto 4 – Viga rompida por Flexão Pura – ( $P=1,45$  tf)

### 5.1.3 Configuração de Ruptura

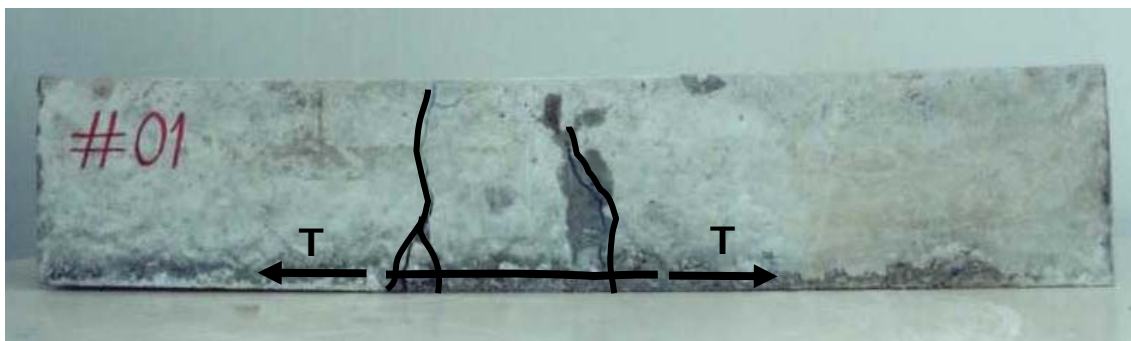


Foto 5 – Modelo de ruptura – fissuras verticais entre as cargas

## 5.2 Ruptura de Cisalhamento por tração

Inexistência de Armadura de Cisalhamento, no trecho entre as cargas e os apoios, para permitir a **Ruptura por Tração na Flexão Simples**.

### 5.2.1 Armadura para modelo de ruptura – região B



Foto 6 – Armadura para ruptura – região B

### 5.2.2 Viga Ensaada



Foto 7 – Viga rompida por Cisalhamento por tração – ( $P=3,25$  tf)

### 5.2.3 Configuração de Ruptura

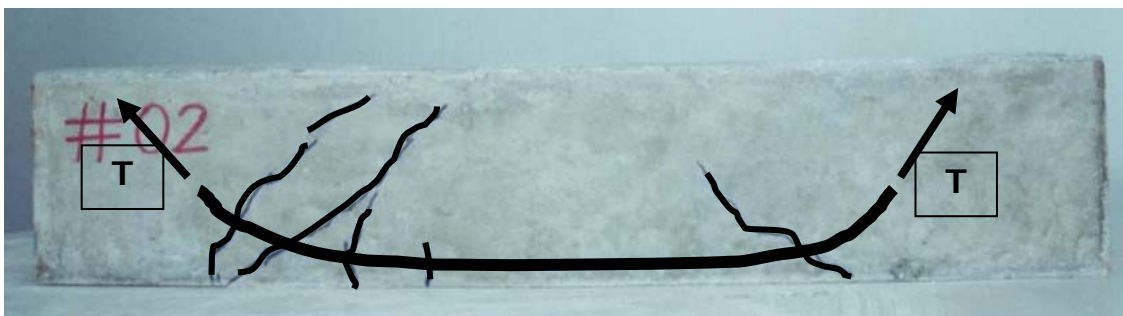


Foto 8 – Modelo de ruptura – fissuras inclinadas entre a carga e o apoio

### 5.3 Ruptura de Cisalhamento por esmagamento da biela comprimida

Enrijecimento da Armadura de Flexão inferior e enrijecimento da Armadura de Cisalhamento, no trecho entre as cargas e os apoios, para permitir a **Ruptura por Compressão (esmagamento) das Bielas Inclinadas**.

#### 5.3.1 Armadura para modelo de ruptura – região E

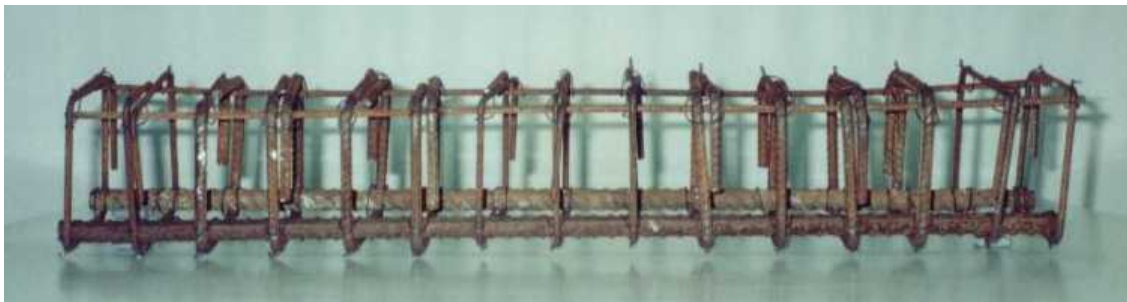


Foto 9 – Armadura para ruptura – região E

#### 5.3.2 Viga Ensaçada



Foto 10 – Viga rompida por esmagamento da biela comprimida – ( $P=5,0$  tf)

#### 5.3.3 Configuração de Ruptura

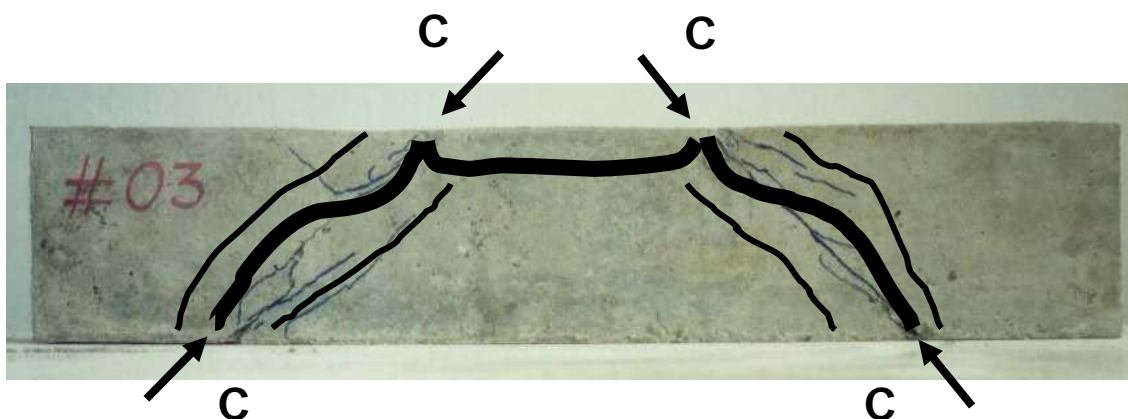


Foto 11 – Modelo de ruptura – esmagamento inclinado entre a carga e o apoio

## 5.4 Ruptura por deficiência de ancoragem

Interrupção da Armadura de Flexão inferior nos apoios.

### 5.4.1 Armadura para modelo de ruptura – região D



Foto 12 – Armadura para ruptura – região D

### 5.4.2 Viga Ensaçada

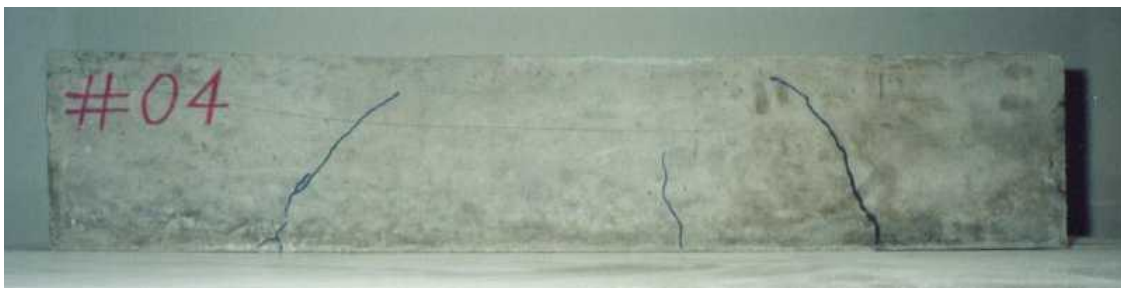


Foto 13 – Viga rompida por deficiência de ancoragem nos apoios – ( $P=5,0$  tf)

### 5.4.3 Configuração de Ruptura

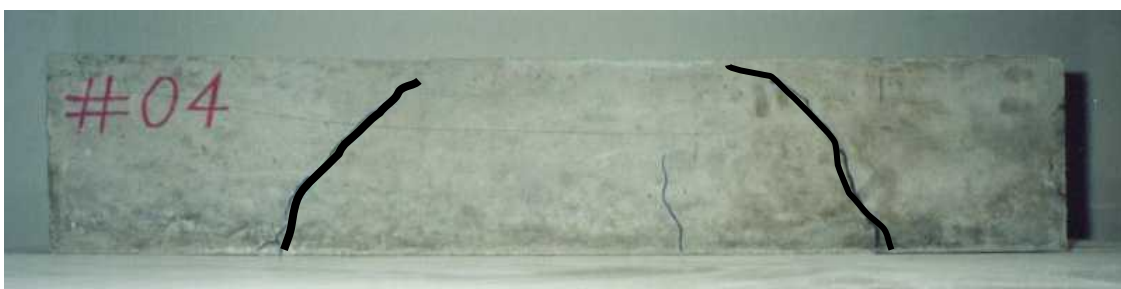


Foto 14 – Modelo de ruptura – deficiência de ancoragem da armadura de flexão



## 5.5 Ruptura da Viga de Referência

Armadura da Viga de Referência, conforme detalhamento no item 4.1.

### 5.5.1 Armadura

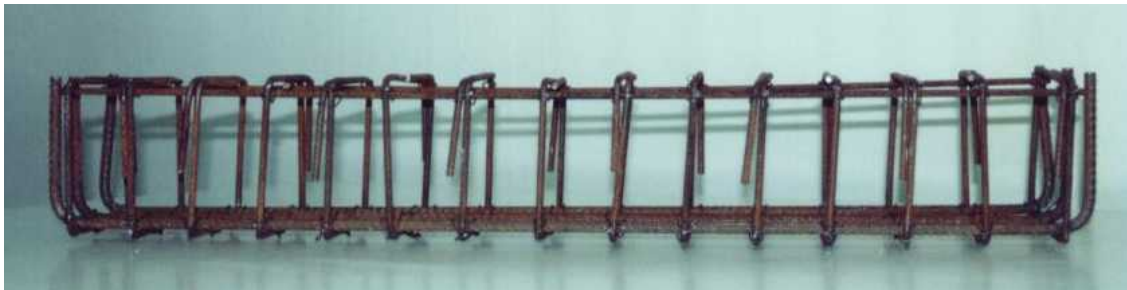


Foto 15 – Armadura – Viga de Referência

### 5.5.2 Viga Ensaçada

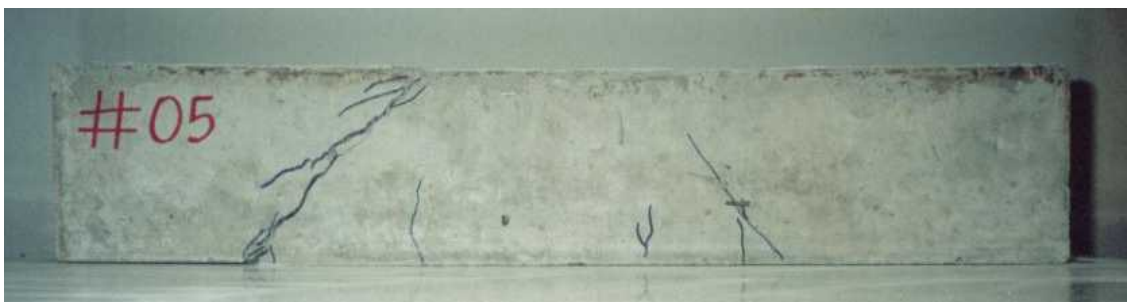


Foto 16 – Viga rompida – ( $P=6,28$  tf)

### 5.5.3 Configuração de Ruptura

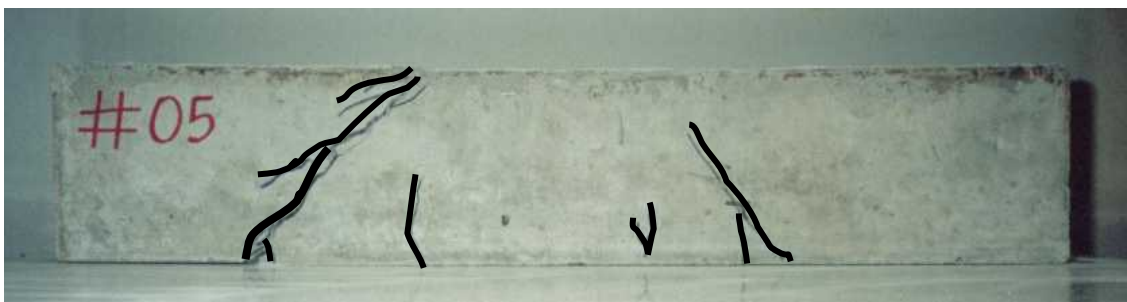


Foto 17 – Modelo de ruptura

## 6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Diversos Modelos de Ruptura verificados nos “Ensaio de Stuttgart” foram reproduzidos em laboratório, a saber: **Ruptura por Tração na Flexão Pura, Ruptura por Tração devido ao Cisalhamento, Ruptura por Compressão devido ao Cisalhamento, Ruptura por Tração devido à Deficiência de Comprimento de Ancoragem.**

A Metodologia utilizada com o arranjo e direcionamento das armaduras, enrijecendo e/ou fragilizando trechos das vigas, conduziu aos resultados esperados, confirmando as hipóteses, revelando que a pesquisa teve êxito, segundo os propósitos a que foi desenvolvida.

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo com Concreto de Elevado Desempenho e a utilização de modelos reduzidos, para uma melhor logística e transporte nas dependências do laboratório.

O resultado desta pesquisa constitui-se parte do material didático da **Disciplina Estruturas de Concreto Armado I**, do Curso de Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia da Universidade Católica de Goiás, facilitando aos acadêmicos a compreensão dos **Modelos de Ruptura de Vigas de Seção Retangular**, bem como auxiliando no aprendizado de **Posicionamento de Armaduras de Flexão e Cisalhamento**.

## 7 Referências

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto**. Vol. I . Editora Globo, Rio de Janeiro, 1985.

ÉBOLI, C. R. **Concreto Armado II – Vigas em Concreto Armado**. Notas de Aula. Escola de Engenharia. Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas. UFRJ.

NBR – 6118. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. ABNT, 2003.

CHAER, A. V., et al.. **Notas de Aula** da disciplina **Estruturas de Concreto Armado I**. Curso Engenharia Civil. Departamento de Engenharia. Universidade Católica de Goiás. Conteúdo disponibilizado para fotocópias, com autorização do autor. Goiânia-GO, 2001.