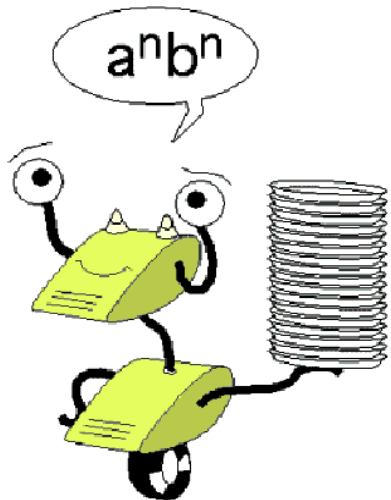


# Autômatos com Pilha

$a^n$



$a^n b^n$



Autômatos com Pilha: Definição Informal e Definição Formal

Linguagem Aceita por um ACP

ACPDet X ACPND

Notação gráfica para ACP

## ACP

- Assim como LR tem um autômato equivalente (AF) as LLC tem também uma máquina (ACP).
- A equivalência é menos geral desde que o ACP é **não determinístico**.
- A versão determinística aceita somente um subconjunto das LLC. Isto é, existem, LLC que não são reconhecidas por ACPDet.
  - Exemplo clássico é  $L = ww^R$  que é aceito por um ACPND mas não por um ACPDet.
- Entretanto esse conjunto inclui a maioria das Linguagens de Programação.

# Hierarquia das Classes de Máquinas e Linguagens

L Recursivamente Enumeráveis/Máquinas de Turing que Reconhecem L

L Recursivas/Máquinas de Turing que Decidem L

L Livres de Contexto/Autômatos a Pilha não Determinísticas

L Livres de Contexto Determinísticas/  
Autômatos a Pilha Determinísticas

L Regulares/Autômatos Finitos

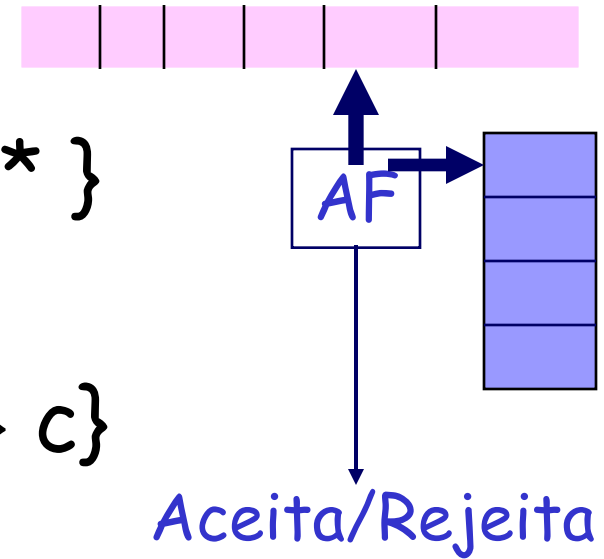
## ACP - Definição Informal

- É um AF com uma fita de entrada e uma pilha com símbolos de um dado alfabeto.

Exemplo:  $L = \{w c w^R \mid w \in \{0,1\}^*\}$

gerada por  $G = (\{S\}, \{0,1,c\}, P, S)$

$P = \{ S \rightarrow 0S0 \mid S \rightarrow 1S1 \mid S \rightarrow c \}$



Exemplos de cadeias aceitas:  $c$ ,  $01c10$ ,  $00c00$

O ACP que reconhece esta linguagem terá:

- Controle Finito com 2 estados:  $q_1$  (empilha) e  $q_2$  (desempilha)
- Pilha com pratos: vermelho, azul (0), verde (1)
- Regras:
  - 1) Começa com prato vermelho na pilha e estado  $q_1$
  - 2) Entrada 0, estado  $q_1 \rightarrow$  empilha azul } Permanece em  $q_1$
  - Entrada 1, estado  $q_1 \rightarrow$  empilha verde }
  - 3) Entrada c, estado  $q_1 \rightarrow$  não altera a pilha muda para  $q_2$
  - 4) Entrada 0, estado  $q_2$ , topo azul  $\rightarrow$  desempilha } Permanece em  $q_2$
  - 5) Entrada 1, estado  $q_2$ , topo verde  $\rightarrow$  desempilha }
  - 6) Estado  $q_2$ , vermelho  $\rightarrow$  desempilha sem ver entrada
  - 7) Para os outros casos não descritos, o dispositivo não faz nenhum movimento

- Este dispositivo aceita uma cadeia de entrada se: **ao processar o último símbolo a pilha fica vazia.**
- Exemplos:
  - 1)  $w = 01c10$

TopoPilha	Estado	Entrada	Pilha
Verm	q1	0	
Azul	q1	1	
Verde	q1	c	<del>verde</del>
Verde	q2	1	<del>azul</del>
Azul	q2	0	<del>verm</del>
Verm	q2	-	

2)  $w = 101c100$

TopoPilha	Estado	Entrada	Pilha
Verm	$q1$	1	
Verde	$q1$	0	<del>verde</del>
Azul	$q1$	1	<del>azul</del>
Verde	$q1$	c	verde
Verde	$q2$	1	verm
Azul	$q2$	0	
Verde	$q2$	0 ação ???	

## ACP - Definição Formal

- OACP terá uma fita de entrada, um controle finito e uma pilha que contém uma cadeia de símbolos de algum alfabeto.
- O símbolo mais à esquerda será considerado estar no TOPO.
- O dispositivo será **não determinístico**, pois terá algum número finito de escolhas de movimentos



## 2 Tipos de Movimentos

### 1. Um símbolo de entrada é lido

e, dependendo (do símbolo de entrada, topo da pilha, estado) realiza 1 escolha dentre as possíveis.

Cada escolha consiste (estado seguinte, cadeia de símbolos (pode ser vazia) para substituir o topo).

Depois da escolha, a cabeça avança.

### 2. Chamado movimento- $\lambda$

similar ao primeiro, exceto que o símbolo de entrada não é usado e a cabeça não avança depois do movimento.

Esse tipo de movimento permite o ACP manipular a pilha sem ler símbolos de entrada.

## Linguagem aceita por um ACP

1. Conjunto de todas as entradas para as quais alguma seqüência de movimentos faz com que a pilha fique vazia → Linguagem aceita por Pilha vazia
2. Similar a AF: definimos alguns estados como finais e definimos a linguagem aceita como o conjunto de todas as entradas para as quais alguma escolha de movimento faz o ACP entrar num estado final → Linguagem aceita por estados finais.

As duas formas acima são equivalentes.

Ver (Menezes, 2002) pg 112

Um ACP  $M$  é uma sétupla  $(K, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, z_0, F)$  onde:

(H,M,U, 2001)

1.  $K$  é um conjunto finito de estados
2.  $\Sigma$  (sigma) é um alfabeto finito chamado alfabeto de entrada
3.  $\Gamma$  (gama) é um alfabeto finito chamado alfabeto da pilha
4.  $q_0 \in K$  é o estado inicial. A máquina começa nele.
5.  $z_0 \in \Gamma$  é o símbolo inicial da pilha. Aparece inicialmente na pilha.
6.  $F$  é o conjunto de estados finais  $F \subseteq K$
7.  $\delta$  (delta) é um mapeamento de

$$K \times (\Sigma \cup \{\lambda\}) \times \Gamma \rightarrow \text{subconjuntos de } K \times \Gamma^* \\ \text{(topo)}$$

OBS: quando o ACP aceita por pilha vazia  $F = \emptyset$

## Interpretação de $\delta$

$$1. \quad \delta (q,a,z) \rightarrow \{(p_1,\gamma_1), (p_2,\gamma_2), \dots (p_m,\gamma_m)\}$$

$q, p_i \in K, \quad a \in \Sigma, \quad z \in \Gamma^*$

ACP no estado  $q$ , com símbolo de entrada  $a$  e  $z$  no topo da pilha pode, para qualquer  $i$ , mudar para o estado  $p_i$ , substituir  $z$  por  $\gamma_i$  (**substitui por uma cadeia de símbolos da pilha**) e avançar a cabeça de leitura.

$$2. \quad \delta (q,\lambda,z) \rightarrow \{(p_1,\gamma_1), (p_2,\gamma_2), \dots (p_m,\gamma_m)\}$$

Semelhante a anterior, só que não espera símbolo de entrada e não avança a cabeça de leitura.

**OBS 1: Se  $\gamma_i = \lambda$  então há desempilhamento; se  $\gamma_i = z$  então a pilha fica inalterada; se  $\gamma_i = yz$  então  $y$  é empilhado.**

**OBS 2: Um ACP não pode fazer um movimento se a pilha estiver vazia.**

- Formalize o ACP do exemplo anterior.  
Deve aceitar por pilha vazia

- Controle Finito com 2 estados:  $q1$  (empilha) e  $q2$  (desempilha)
- Pilha com pratos: vermelho, azul (0), verde (1)
- Regras:
- Começa com prato vermelho na pilha e estado  $q1$
- Entrada 0, estado  $q1 \rightarrow$  empilha azul
- Entrada 1, estado  $q1 \rightarrow$  empilha verde
- Entrada  $c$ , estado  $q1 \rightarrow$  não altera a pilha muda para  $q2$
- Entrada 0, estado  $q2$ , topo azul  $\rightarrow$  desempilha
- Entrada 1, estado  $q2$ , topo verde  $\rightarrow$  desempilha
- Estado  $q2$ , vermelho  $\rightarrow$  desempilha sem ver entrada
- Para os outros casos não descritos, o dispositivo não faz nenhum movimento

- $M = (\{q1, q2\}, \{0, 1, c\}, \{Vm, Az, Vd\}, \delta, q1, Vm, \emptyset)$

- |   |   |
|---|---|
| 1. $\delta(q1, 0, Vm) = \{(q1, AzVm)\}$ | 7. $\delta(q1, c, Vm) = \{(q2, Vm)\}$             |
| 2. $\delta(q1, 0, Az) = \{(q1, AzAz)\}$ | 8. $\delta(q1, c, Az) = \{(q2, Az)\}$             |
| 3. $\delta(q1, 0, Vd) = \{(q1, AzVd)\}$ | 9. $\delta(q1, c, Vd) = \{(q2, Vd)\}$             |
| 4. $\delta(q1, 1, Vm) = \{(q1, VdVm)\}$ | 10. $\delta(q2, 0, Az) = \{(q2, \lambda)\}$       |
| 5. $\delta(q1, 1, Az) = \{(q1, VdAz)\}$ | 11. $\delta(q2, 1, Vd) = \{(q2, \lambda)\}$       |
| 6. $\delta(q1, 1, Vd) = \{(q1, VdVd)\}$ | 12. $\delta(q2, \lambda, Vm) = \{(q2, \lambda)\}$ |

Todos os conjuntos só possuem 1 elemento e  $\delta$  não é definida para  $\delta(q2, 0, Vm)$  e  $\delta(q2, 1, Vm)$ , pois é definida para  $\delta(q2, \lambda, Vm)$

# ACPDet

- O ACP do exemplo é **determinístico** no sentido que, no máximo um movimento é possível de qualquer configuração. Podemos tirar o  $\{e\}$
- **Formalmente, dizemos que um ACP  $M = (K, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, z_0, F)$  é determinístico se:**

1. Para cada  $q \in K$  e  $z \in \Gamma$  se  $\delta(q, \lambda, z)$  é não vazio então  $\delta(q, a, z)$  é vazio para  $\forall a \in \Sigma$

(impede a possibilidade de escolha entre um mov- $\lambda$  e um envolvendo um símbolo de entrada)

2.  $\delta(q, a, z)$  contém um só elemento para  $\forall q \in K, a \in \Sigma \cup \{\lambda\}, z \in \Gamma$

(impede a escolha de movimento tanto para  $(q, a, z)$  como para  $(q, \lambda, z)$ )



- Façam um ACP não-determinístico que reconhece  $L = \{ww^R \mid w \in \{0,1\}^*\}$  por pilha vazia
- Vejam que aqui o ACP deve aceitar a cadeia vazia.

$$M = (\{q1, q2\}, \{0, 1, c\}, \{Vm, Az, Vd\}, \delta, q1, Vm, \emptyset)$$

- |  |  |
|--|--|
| 1. $\delta(q1, 0, Vm) = \{(q1, AzVm)\}$                | 2. $\delta(q1, 1, Vm) = \{(q1, VdVm)\}$                |
| 3. $\delta(q1, 0, Az) = \{(q1, AzAz), (q2, \lambda)\}$ | 4. $\delta(q1, 0, Vd) = \{(q1, AzVd)\}$                |
| 5. $\delta(q1, 1, Az) = \{(q1, VdAz)\}$                | 6. $\delta(q1, 1, Vd) = \{(q1, VdVd), (q2, \lambda)\}$ |
| 7. $\delta(q2, 0, Az) = \{(q2, \lambda)\}$             | 8. $\delta(q2, 1, Vd) = \{(q2, \lambda)\}$             |
| 9. $\delta(q1, \lambda, Vm) = \{(q2, \lambda)\}$       | 10. $\delta(q2, \lambda, Vm) = \{(q2, \lambda)\}$      |

- M aceita a cadeia vazia pela regra 9
- O ACP é **não determinístico** pois:
  - As regras 3 e 6 possuem uma escolha de movimento.
  - Se M decide que o meio da cadeia de entrada foi alcançado então escolhe a segunda opção do conjunto e vai para o estado q2.
  - $\delta$  é definida para  $\delta(q1, \lambda, Vm)$  e também para  $\delta(q1, 0, Vm)$  e  $\delta(q1, 1, Vm)$

## Configuração de um ACP e Mudança de configuração

- Uma configuração de um ACP  $M$  é um par  $(q, \gamma)$  onde  $q \in K$  e  $\gamma \in \Gamma^*$
- Mudança de configuração:

Seja  $a \in \Sigma \cup \{\lambda\}$ ,  $\gamma$  e  $\beta \in \Gamma^*$ ,  $z \in \Gamma$  e  $\delta(q, a, z) = (p, \beta)$  então:

$$a: (q, z\gamma) \underset{M}{|--} (p, \beta\gamma)$$

Significa que, de acordo com as regras do ACP, a entrada  $a$  faz com que  $M$  vá da configuração  $(q, z\gamma)$  para  $(p, \beta\gamma)$ .

Estendendo para cadeia:

$$a_1 a_2 \dots a_n: (q_1, \gamma_1) \underset{M}{|--}^* (q_{n+1}, \gamma_{n+1})$$

$$\text{Por convenção: } \lambda: (q, \gamma) \underset{M}{|--}^* (q, \gamma)$$

(H, M, U, 2001) pg 224 define configuração como uma tripla pois embute a cadeia de entrada no par acima. Difere somente a notação!

# Linguagem Aceita

- Para um ACP  $M$ , definimos  $L(M)$ , a linguagem aceita por **estado final** como:

$$L(M) = \{w \mid w:(q_0, z_0) \xrightarrow[M]{--*} (q, \gamma) \text{ para } \forall \gamma \in \Gamma^* \text{ e } q \in F\}$$

- Para um ACP  $M$  nós definimos  $N(M)$ , a linguagem aceita por **pilha vazia** como:

$$N(M) = \{w \mid w:(q_0, z_0) \xrightarrow[M]{--*} (q, \lambda) \text{ para } \forall q \in K\}$$

O  $N$  em  $N(M)$  significa null stack = empty stack

OBS 1: quando aceitamos por pilha vazia o conjunto de estados finais é irrelevante.

OBS 2: As duas definições são equivalentes: ver Teo 6.9 e Teo 6.11 em (H,M,U, 2001)

## Exercício 1

- Encontre um ACP  $M$  que reconheça o conjunto  $L = \{ w \mid w \in \{0,1\}^* \text{ e } w \text{ consiste de } nro(1) = nro(0) \}$  por pilha vazia.
- Diga se o ACP é ACPDET ou ACPND
- Mostrar as configurações do ACP com a entrada 0101

Dica:

- associar 0 com  $Az$  e 1 com  $Vd$
- "matar" 0 com 1 e 1 com 0
- fazer regra para aceitar cadeia vazia

- Qual seria a *GLC* que reconhece esta linguagem?

Qual seria a *GLC* que reconhece esta linguagem?

$$G = (\{S, A\}, \{0, 1\}, P, S)$$

$$P = \{S \rightarrow \lambda \mid A$$

$$A \rightarrow 0A1 \mid 1A0 \mid 01 \mid 10 \mid A01 \mid A10 \}$$

OU

$$P = \{S \rightarrow \lambda \mid A$$

$$A \rightarrow 0A1 \mid 1A0 \mid 01 \mid 10 \mid 01A \mid 10A \}$$

As regras 7 e 8 precisam estar lá para reconhecer, p.e., 0110 e 1001

$$M = (\{q1\}, \{0,1\}, \{Vm, Az, Vd\}, \delta, q1, Vm, \emptyset)$$

$$1. \quad \delta(q1, 0, Vm) = \{(q1, AzVm)\}$$

$$2. \quad \delta(q1, 1, Vm) = \{(q1, VdVm)\}$$

$$3. \quad \delta(q1, 0, Az) = \{(q1, AzAz)\}$$

$$4. \quad \delta(q1, 1, Vd) = \{(q1, VdVd)\}$$

$$5. \quad \delta(q1, 1, Az) = \{(q1, \lambda)\}$$

$$6. \quad \delta(q1, 0, Vd) = \{(q1, \lambda)\}$$

$$7. \quad \delta(q1, \lambda, Vm) = \{(q1, \lambda)\}$$

ACPND pelas regras 1, 2 e 7 pois temos a chance de ler um símbolo da entrada ou usar um mov- $\lambda$ .



# Configurações para 0101

Entrada	Configuração
	$(q1, Vm)$
0	$(q1, AzVm)$
01	$(q1, Vm)$
010	$(q1, AzVm)$
0101	$(q1, Vm)$
$\lambda$	$(q1, \lambda)$

## Exercício 2

- Encontre um ACP  $M$  que reconheça o conjunto  $L = \{ 0^n 1^n \mid n > 0 \}$  por pilha vazia.
- Diga se o ACP é ACPDET ou ACPND

## Notação gráfica para ACP

- O diagrama de transição para ACP que aceitam a linguagem por estado final segue:
- Os nós correspondem aos estados do ACP
- Existem o estado inicial e os finais
- Um arco rotulado com  $a, X; \alpha$  do estado  $q$  para  $p$  significa que  $\delta(q, a, X)$  contém o par  $(p, \alpha)$  entre os pares.
- Convencionalmente,  $Z_0$  é o símbolo da pilha (no JFLAP é  $Z$ ).
- Leia-se: simbolo, topo\_antigo;novo\_topo

# JFLAP mostrando a Configuração Inicial

The screenshot displays the JFLAP software interface. At the top, the title bar reads "JFLAP : <untitled1>". Below it is a menu bar with "File", "Input", "Test", "Convert", and "Help". A toolbar contains icons for "LG", a search icon, a refresh icon, and a dropdown arrow. Below the menu bar is a tab labeled "Editor" and a status bar showing "Simulate: 0110".

The main workspace shows a finite automaton with three states:  $q_0$  (start state, green circle),  $q_1$  (yellow circle), and  $q_2$  (final state, double yellow circle). The transitions are as follows:

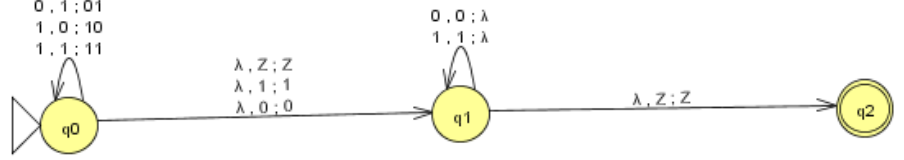
- From  $q_0$  to  $q_0$ :  $0, Z; 0Z$ ,  $1, Z; 1Z$ ,  $0, 0; 00$ ,  $0, 1; 01$ ,  $1, 0; 10$ ,  $1, 1; 11$
- From  $q_0$  to  $q_1$ :  $\lambda, Z; Z$ ,  $\lambda, 1; 1$ ,  $\lambda, 0; 0$
- From  $q_1$  to  $q_1$ :  $0, 0; \lambda$ ,  $1, 1; \lambda$
- From  $q_1$  to  $q_2$ :  $\lambda, Z; Z$

At the bottom left, there is a control panel with buttons: "Step", "Reset", "Freeze", "Thaw", "Trace", and "Remove". To the right of these buttons is a text area containing the following text:

$L = \{ww^R \mid w \text{ pertence a } \{0,1\}^*\}$   
Cadeia submetida 0110  
Z é o símbolo inicial da pilha

The bottom status bar shows the Windows taskbar with "Iniciar", "Sce185\_2005\_A\_B", "Microsoft PowerPoint - [...]", and "JFLAP : <untitled1>". The system clock shows "16:06".

0,Z:0Z  
1,Z:1Z  
0,0:00  
0,1:01  
1,0:10  
1,1:11



Input	Result
10	Reject
01	Reject
1001	Accept
11000011	Accept
	Accept

$$L = \{ww^R \mid w \text{ pertence a } \{0,1\}^*\}$$

# JFLAP mostrando o tracing de aceitação

The screenshot shows the JFLAP software interface. At the top, the title bar reads "JFLAP : <untitled1>". Below it is a menu bar with "File", "Input", "Test", "Convert", and "Help". The main window is titled "Editor" and contains a state transition diagram for a Turing machine with three states: q0, q1, and q2. State q0 is the start state, indicated by a triangle. Transitions are as follows: q0 has a self-loop for (0,Z) and (1,Z); q0 transitions to q1 on (0,0) and (1,0); q1 has a self-loop for (0,0) and (1,1); q1 transitions to q2 on (0,0) and (1,1). State q2 is the final state, indicated by a double circle. A dialog box titled "Accepting configuration found!" is open in the bottom right, showing a vertical sequence of configurations for the string "11". Each configuration consists of a state and a tape segment. The configurations are: q0 | 11, q0 | 11, q1 | 11, q1 | 11, and q2 | 11. Below the configurations are two buttons: "Keep looking" and "I'm done".

0, Z; 0Z  
1, Z; 1Z  
0, 0; 00  
0, 1; 01  
1, 0; 10  
1, 1; 11

$\lambda, Z; Z$   
 $\lambda, 1; 1$   
 $\lambda, 0; 0$

$0, 0; \lambda$   
 $1, 1; \lambda$

$\lambda, Z; Z$

q0 q1 q2

Accepting configuration found!

q0 11  
Z

q0 11  
1Z

q1 11  
1Z

q1 11  
Z

q2 11  
Z

Keep looking I'm done

Cadeia submetida: 11

$L = \{ww^R \mid w \text{ pertence a } \{0,1\}^*\}$

Iniciar Sce185\_2005\_A\_B Microsoft PowerPoint - [...] JFLAP : <untitled1> 16:11

# JFlap mostrando a aceitação de cadeia

The screenshot shows the JFLAP software interface. The main window displays a finite automaton with three states:  $q_0$  (start state),  $q_1$ , and  $q_2$  (final state). The transitions are as follows:

- $q_0$  to  $q_0$ :  $0, Z; 0Z$ ,  $1, Z; 1Z$ ,  $0, 0; 00$ ,  $0, 1; 01$ ,  $1, 0; 10$ ,  $1, 1; 11$
- $q_0$  to  $q_1$ :  $c, 1; 1$ ,  $c, 0; 0$ ,  $c, Z; Z$
- $q_1$  to  $q_1$ :  $0, 0; \lambda$ ,  $1, 1; \lambda$
- $q_1$  to  $q_2$ :  $\lambda, Z; Z$

The simulation window at the bottom left shows the current state  $q_2$  and the input string  $01c10$ . The stack contains the symbol  $z$ .

The main simulation area contains the following text:

$$L = \{wcw^R \mid w \text{ pertence a } \{0,1\}^*\}$$

Cadeia submetida 01c10

Z é o símbolo inicial da pilha

At the bottom of the window, there are control buttons: Step, Reset, Freeze, Thaw, Trace, and Remove. The taskbar at the very bottom shows the Windows taskbar with the Start button and several open applications: Iniciar, Sce185\_2005\_A\_B, Microsoft PowerPoint - [...], and JFLAP : (acp2.jff). The system clock shows 17:14.

# Jflap mostrando rejeição de cadeia

The screenshot shows the JFLAP software interface. At the top, the title bar reads "JFLAP : (acp2.jff)". Below it is a menu bar with "File", "Input", "Test", "Convert", and "Help". The main window is titled "Editor" and "Simulate: 11".

The diagram shows a finite automaton with three states:  $q_0$  (start state, green circle),  $q_1$  (yellow circle), and  $q_2$  (final state, yellow circle with a double border). The transitions are:

- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $0, Z; 0Z$
- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $1, Z; 1Z$
- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $0, 0; 00$
- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $0, 1; 01$
- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $1, 0; 10$
- $q_0 \rightarrow q_0$  on  $1, 1; 11$
- $q_0 \rightarrow q_1$  on  $c, 1; 1$
- $q_0 \rightarrow q_1$  on  $c, 0; 0$
- $q_0 \rightarrow q_1$  on  $c, Z; Z$
- $q_1 \rightarrow q_1$  on  $0, 0; \lambda$
- $q_1 \rightarrow q_1$  on  $1, 1; \lambda$
- $q_1 \rightarrow q_2$  on  $\lambda, Z; Z$

The simulation window at the bottom left shows the current state  $q_0$  and the input string "11Z".

The main text area contains the following text:

$L = \{wcw^R \mid w \text{ pertence a } \{0,1\}^*\}$   
Cadeia submetida 11  
Z é o símbolo inicial da pilha

At the bottom of the window, there are control buttons: "Step", "Reset", "Freeze", "Thaw", "Trace", and "Remove". The taskbar at the very bottom shows the Windows taskbar with the "Iniciar" button and several open applications: "Sce185\_2005\_A\_B", "Microsoft PowerPoint - [...]", and "JFLAP : (acp2.jff)". The system clock shows "17:15".