MO615B - Implementação de Linguagens II
e
MC900A - Tópicos Especiais em Linguagem de Programação

Prof. Sandro Rigo

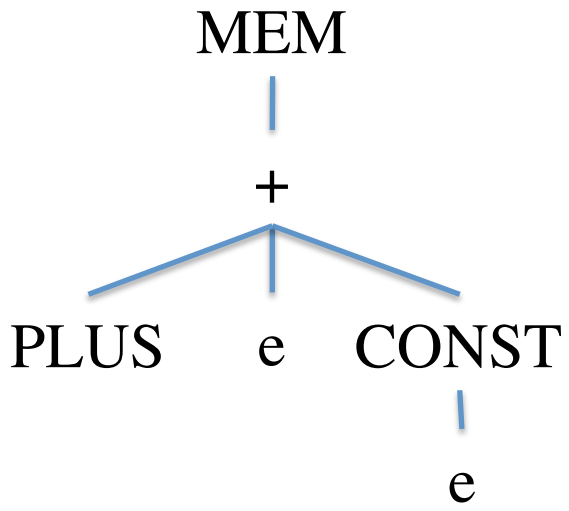
www.ic.unicamp.br/~sandro

Seleção de Instruções

Introdução

- Vamos supor que a IR é representada com árvores
- A árvore da IR expressa uma operação "simples" em cada nó
  - Acesso à memória
  - Operador Binário
  - Salto condicional
- Instruções da máquina podem realizar uma ou mais dessas operações

Introdução



- Que instrução seria essa?
- Encontrar o conjunto de instruções de máquinas que implementa uma dada árvore da IR é o objetivo da ***Seleção de Instruções***

Padrões de Árvores

- Podemos expressar instruções da máquina como um fragmento da árvore da IR. C
  - Padrões de árvore.
- Seleção de instruções:
    - Cubra a árvore da IR com o “menor“ número de padrões existentes para a máquina alvo.
- Exemplo:
  - Arquitetura *Jouette*

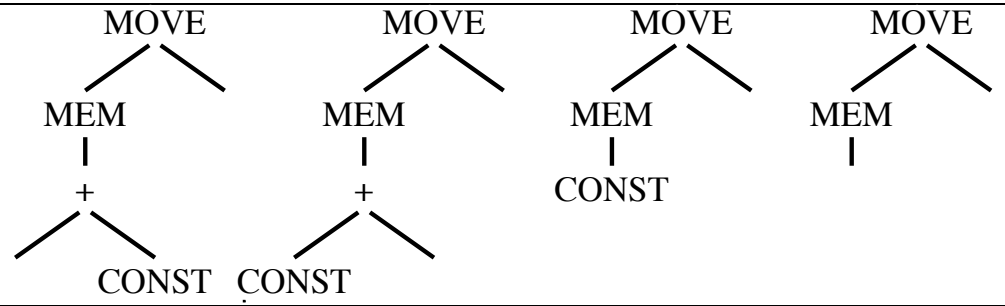
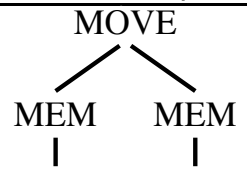
Arquitetura *Joulette*

- Arquitetura Load/Store
- Qualquer instrução pode acessar qualquer registrador
- Registradores podem armazenar dado ou endereço
- r_0 sempre contém zero.
- Cada instrução gasta 1 ciclo
- Executa apenas uma instrução por ciclo

Padrões de Árvore - *Jouette*

Name	*Effect*	*Trees*
—	r_i	TEMP
ADD	$r_i \leftarrow r_j + r_k$	+
MUL	$r_i \leftarrow r_j \times r_k$	*
SUB	$r_i \leftarrow r_j \quad r_k$	-
DIV	$r_i \leftarrow r_j / r_k$	/
ADDI	$r_i \leftarrow r_j + c$	+ CONST + CONST CONST
SUBI	$r_i \leftarrow r_j \quad c$	- CONST
LOAD	$r_i \leftarrow M[r_j + c]$	MEM + CONST MEM + CONST MEM CONST MEM

Padrões de Árvore- *Jouette*

Name	*Effect*	*Trees*
STORE	$M[r_j + c] \leftarrow r_i$	
MOVEM	$M[r_j] \leftarrow M[r_i]$	

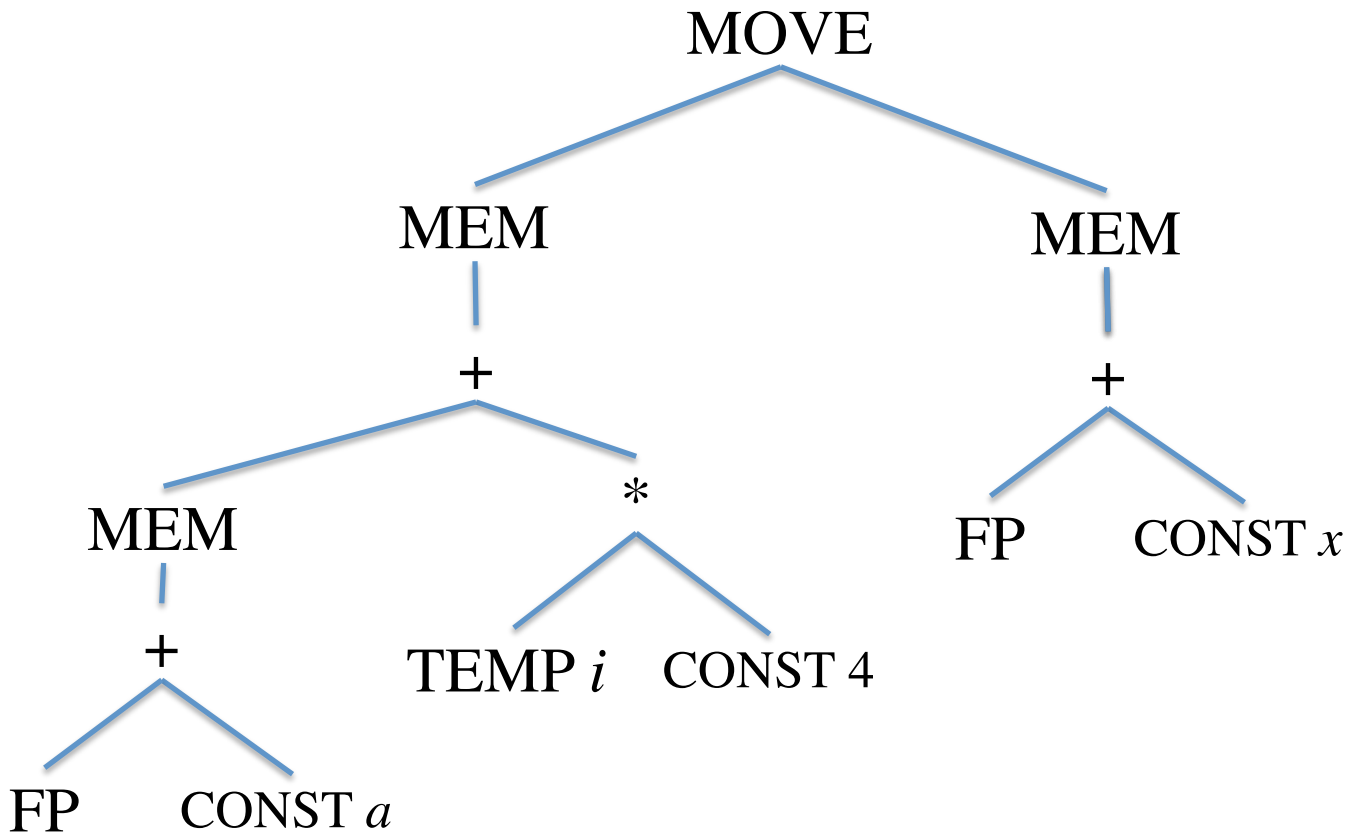
Seleção de Instruções

- Objetivo é cobrir a árvore com padrões, sem sobreposição entre padrões.
- Exemplo:
  - a[i] := x
  - Supondo que i está em um registrador e as variáveis *a* e *x* estão na pilha (indexada por FP)

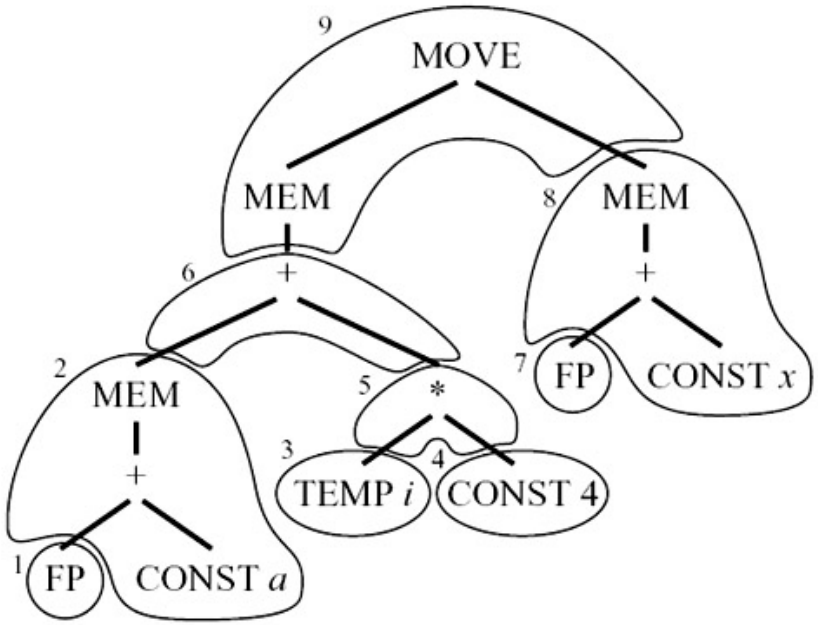
Seleção de Instruções

a[i] := x

- Supondo que i está em um registrador e as variáveis *a* e *x* estão na pilha (indexada por FP)



Seleção de Instruções

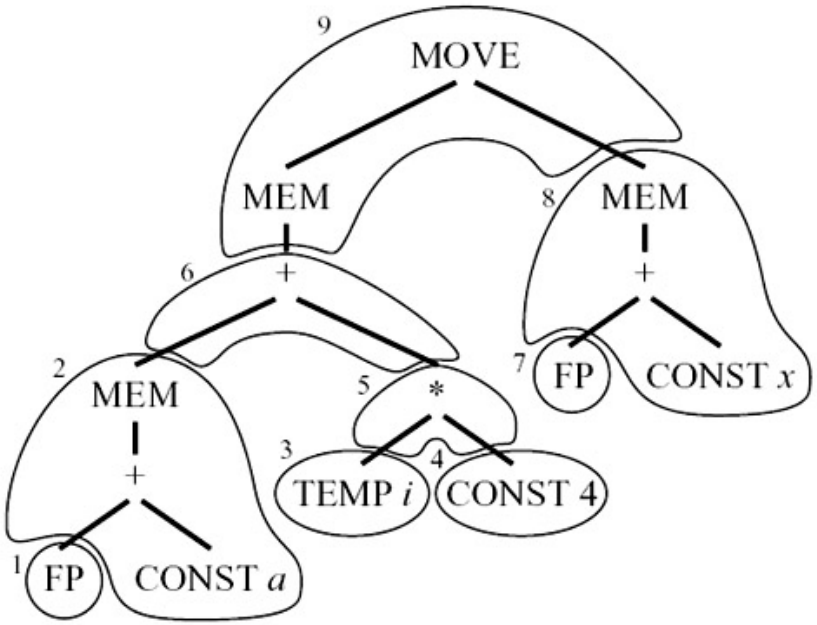


2	LOAD	$r_1 \leftarrow M[\mathbf{fp} + a]$
4	ADDI	$r_2 \leftarrow r_0 + 4$
5	MUL	$r_2 \leftarrow r_i \times r_2$
6	ADD	$r_1 \leftarrow r_1 + r_2$
8	LOAD	$r_2 \leftarrow M[\mathbf{fp} + x]$
9	STORE	$M[r_1 + 0] \leftarrow r_2$

- Uma possível solução

Seleção de Instruções

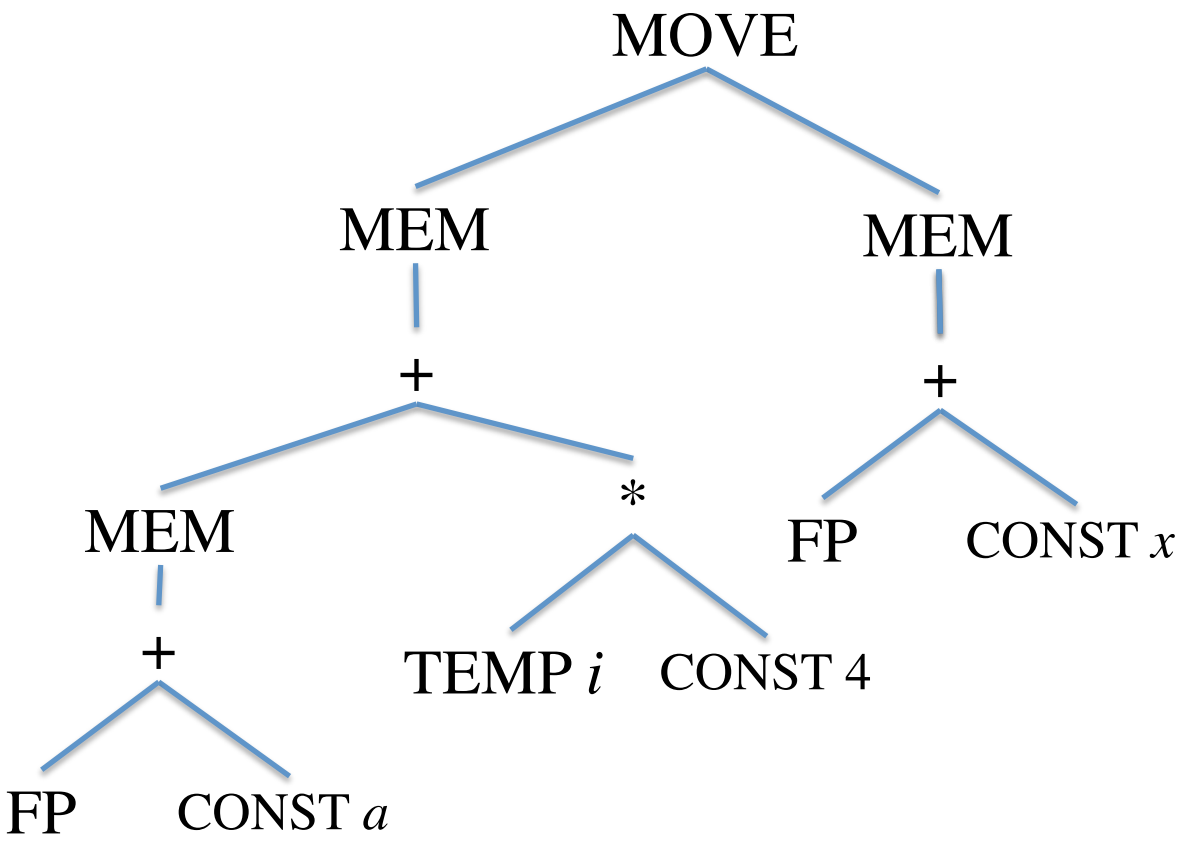
- A cobertura não é única!



2	LOAD	$r_1 \leftarrow M[\mathbf{fp} + a]$
4	ADDI	$r_2 \leftarrow r_0 + 4$
5	MUL	$r_2 \leftarrow r_i \times r_2$
6	ADD	$r_1 \leftarrow r_1 + r_2$
8	LOAD	$r_2 \leftarrow M[\mathbf{fp} + x]$
9	STORE	$M[r_1 + 0] \leftarrow r_2$

Seleção de Instruções

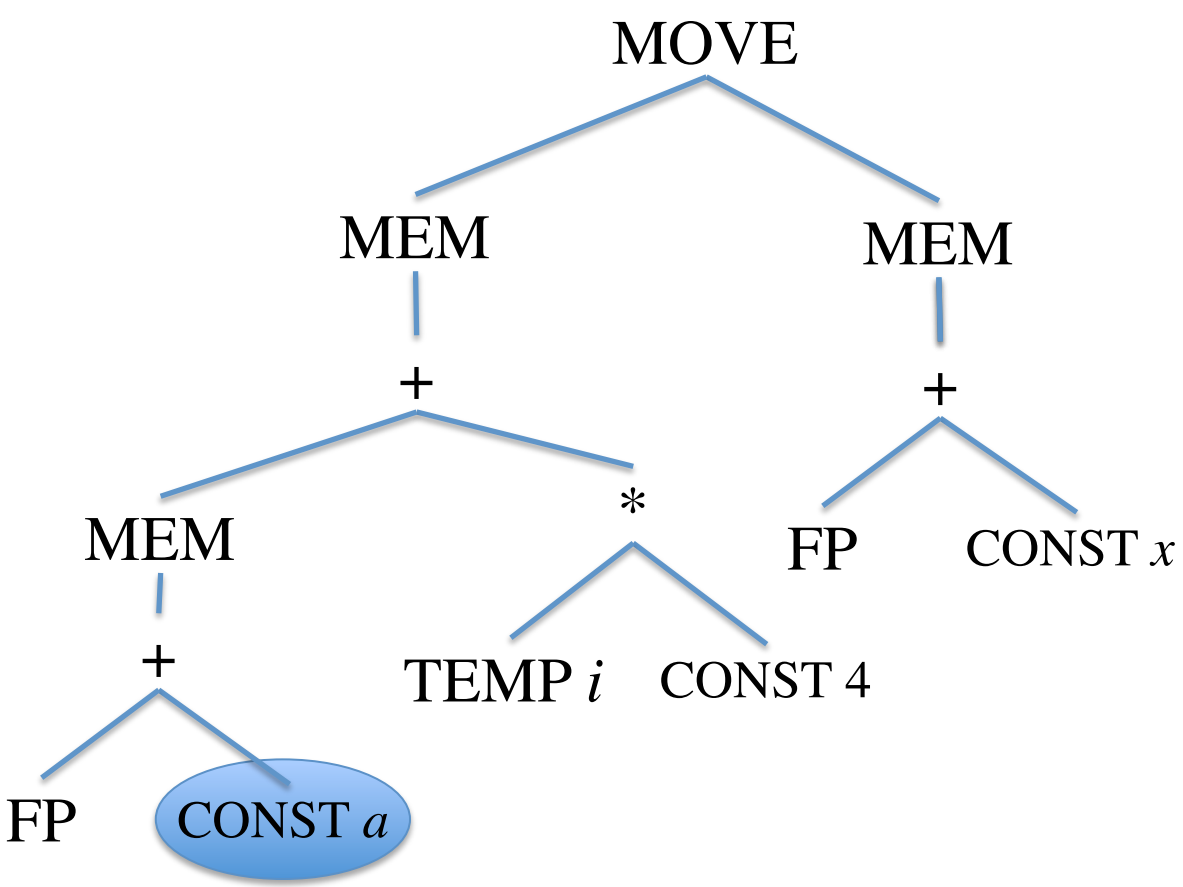
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



Seleção de Instruções

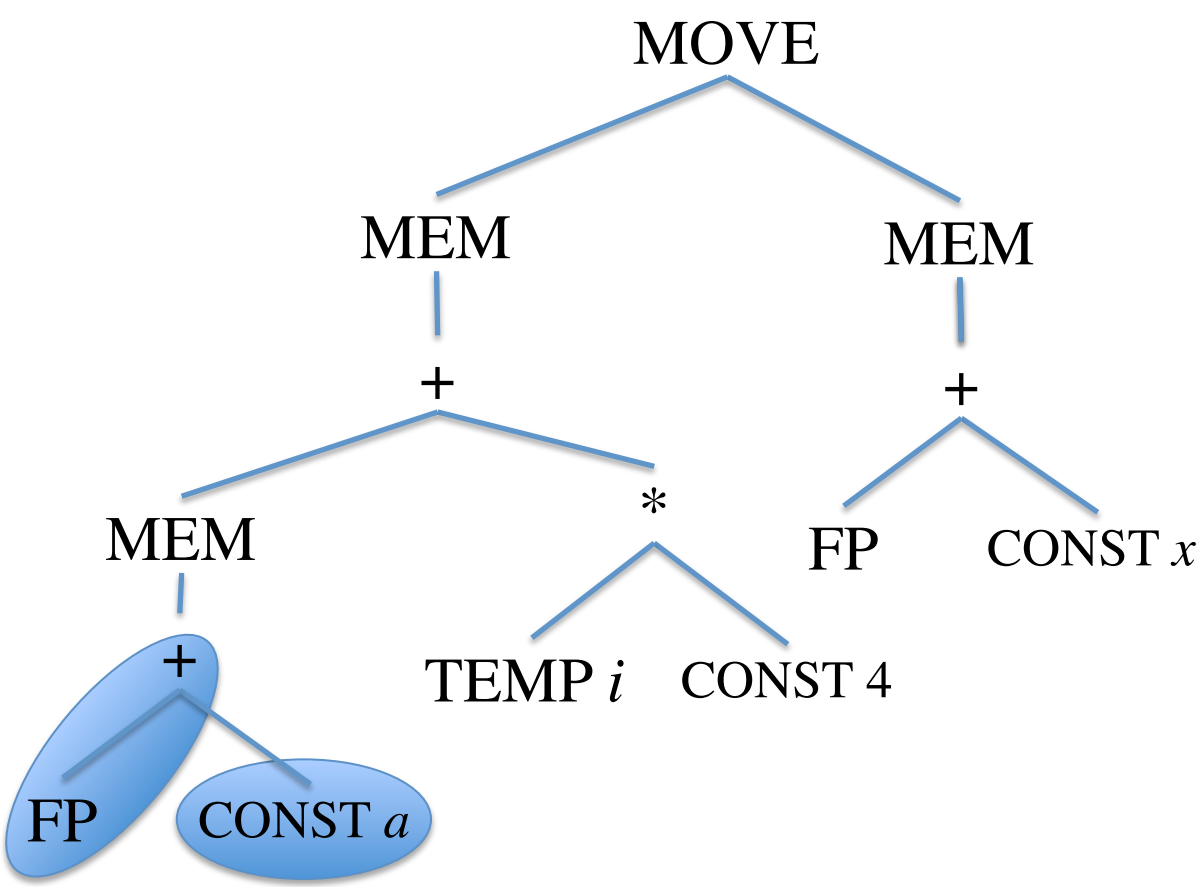
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?

ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$



Seleção de Instruções

- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?

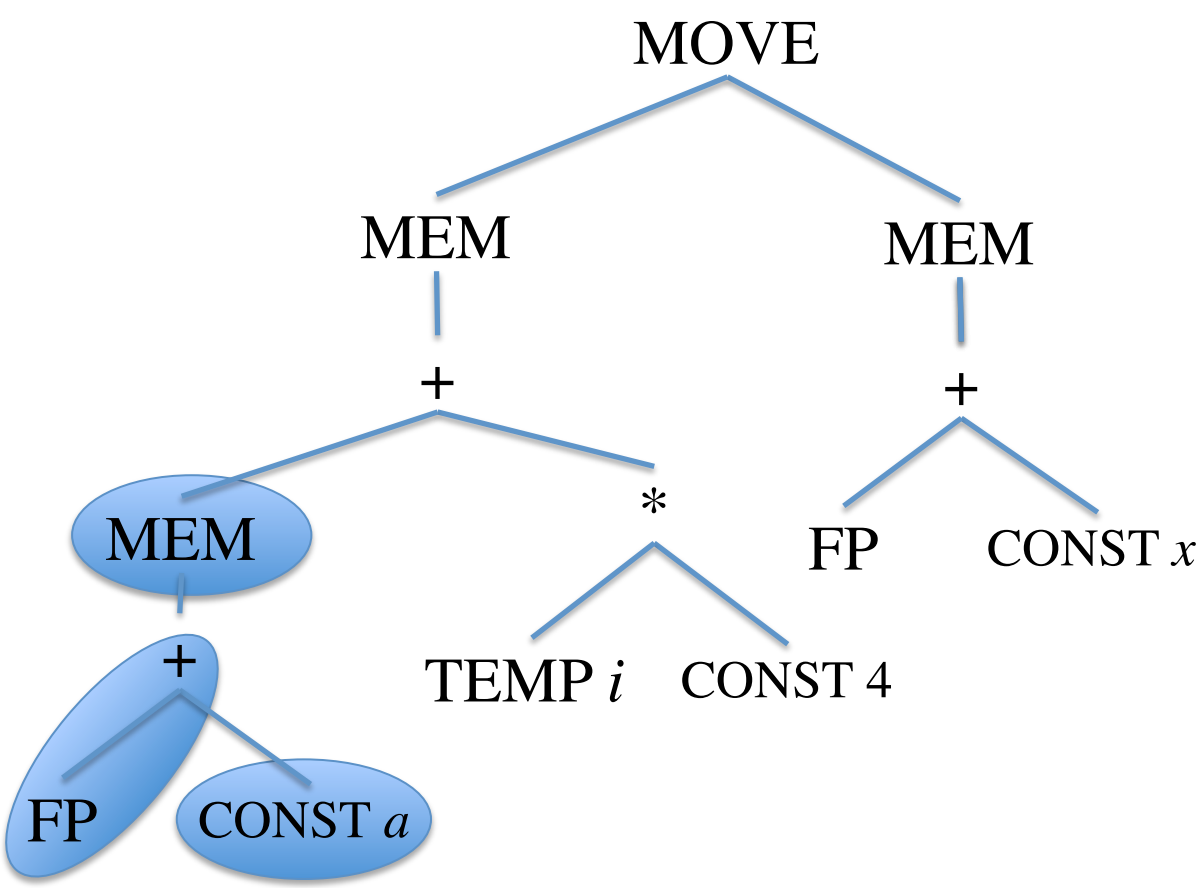


ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$

ADD $r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$

Seleção de Instruções

- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



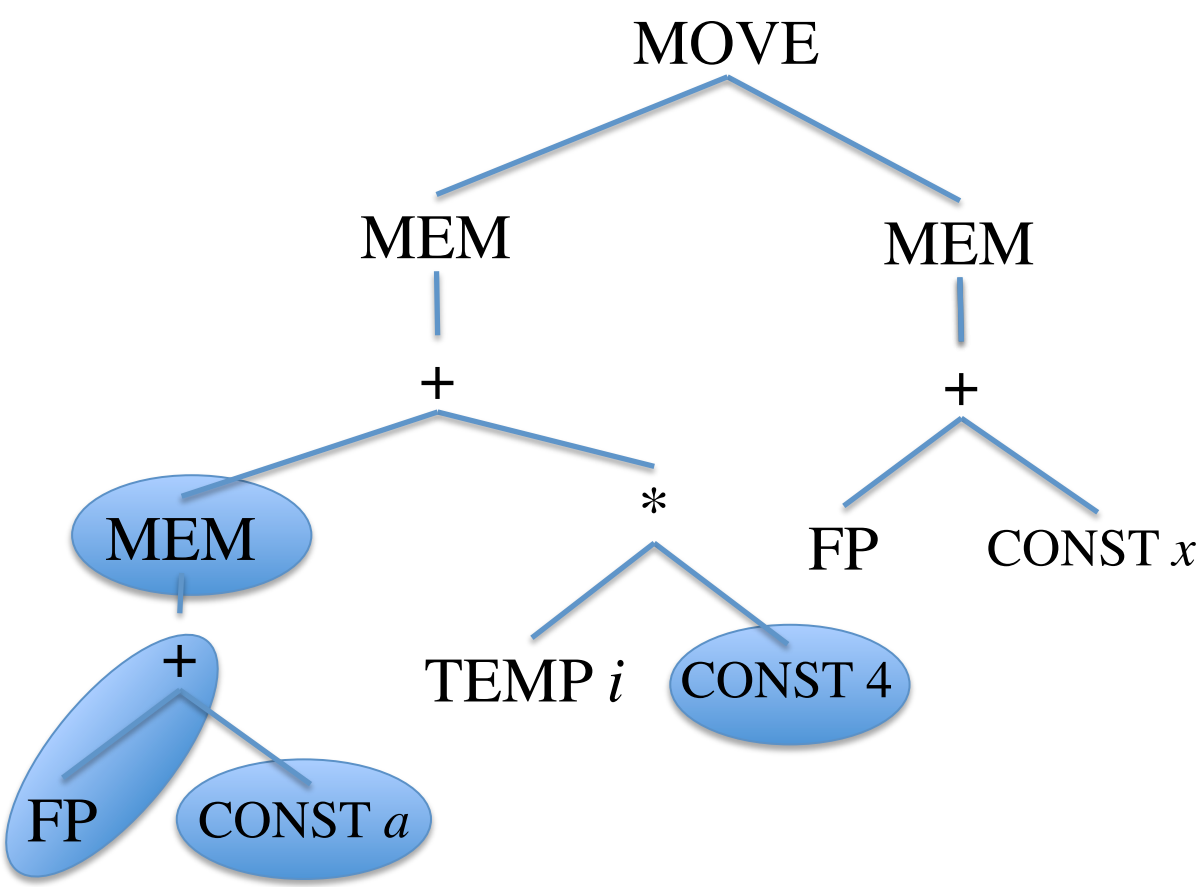
ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$

ADD $r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$

LOAD $r1 \leftarrow M[r1 + 0]$

Seleção de Instruções

- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$

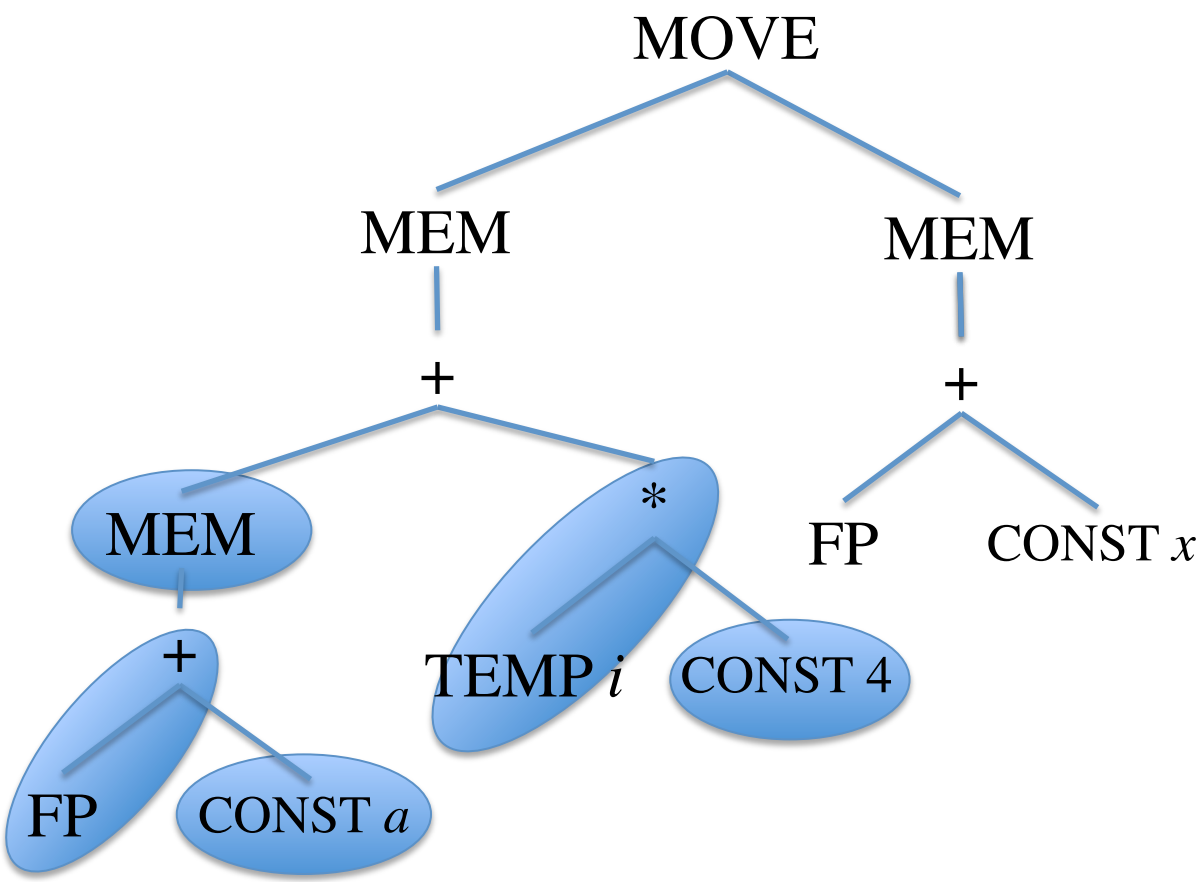
ADD $r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$

LOAD $r1 \leftarrow M[r1 + 0]$

ADDI $r2 \leftarrow r0 + 4$

Seleção de Instruções

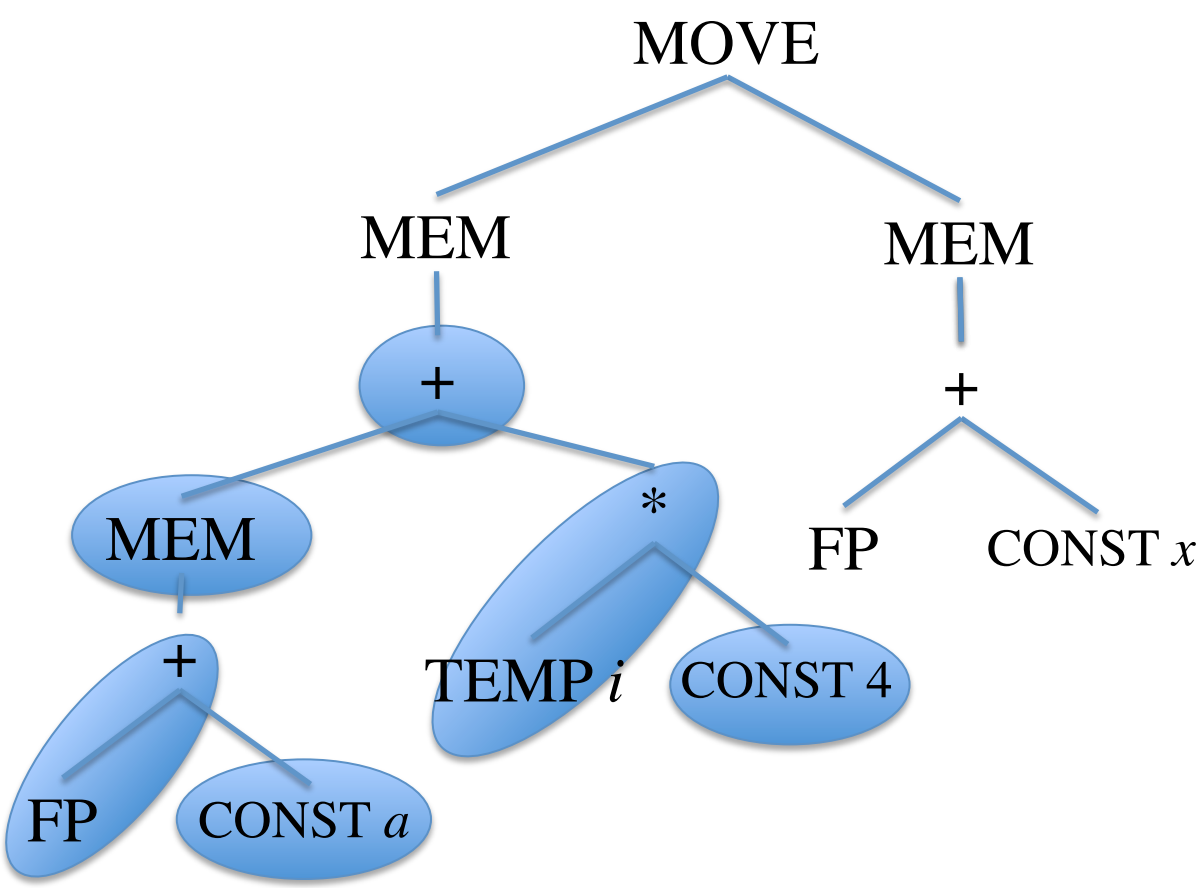
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI	$r1 \leftarrow r0 + a$
ADD	$r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$
LOAD	$r1 \leftarrow M[r1 + 0]$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + 4$
MUL	$r2 \leftarrow ri \times r2$

Seleção de Instruções

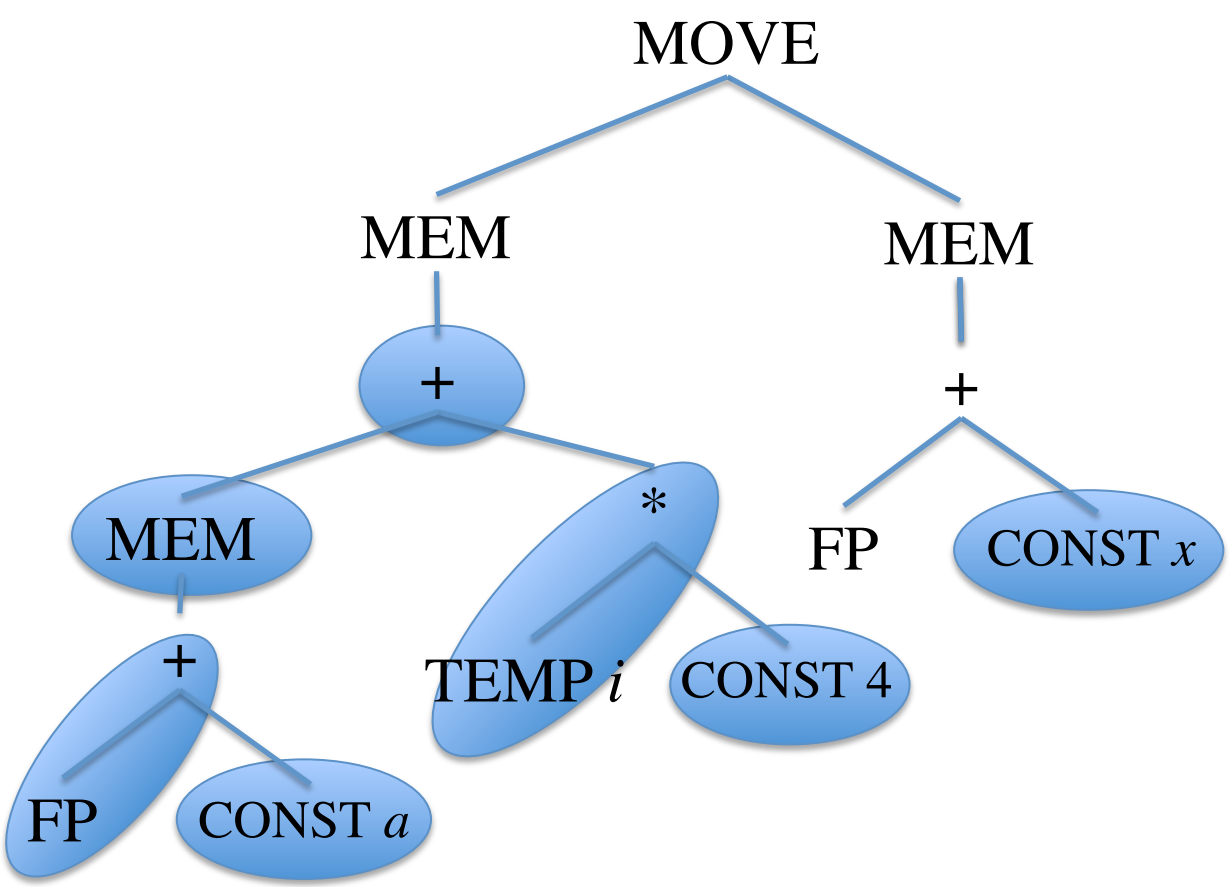
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI	$r1 \leftarrow r0 + a$
ADD	$r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$
LOAD	$r1 \leftarrow M[r1 + 0]$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + 4$
MUL	$r2 \leftarrow ri \times r2$
ADD	$r1 \leftarrow r1 + r2$

Seleção de Instruções

- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$

ADD $r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$

LOAD $r1 \leftarrow M[r1 + 0]$

ADDI $r2 \leftarrow r0 + 4$

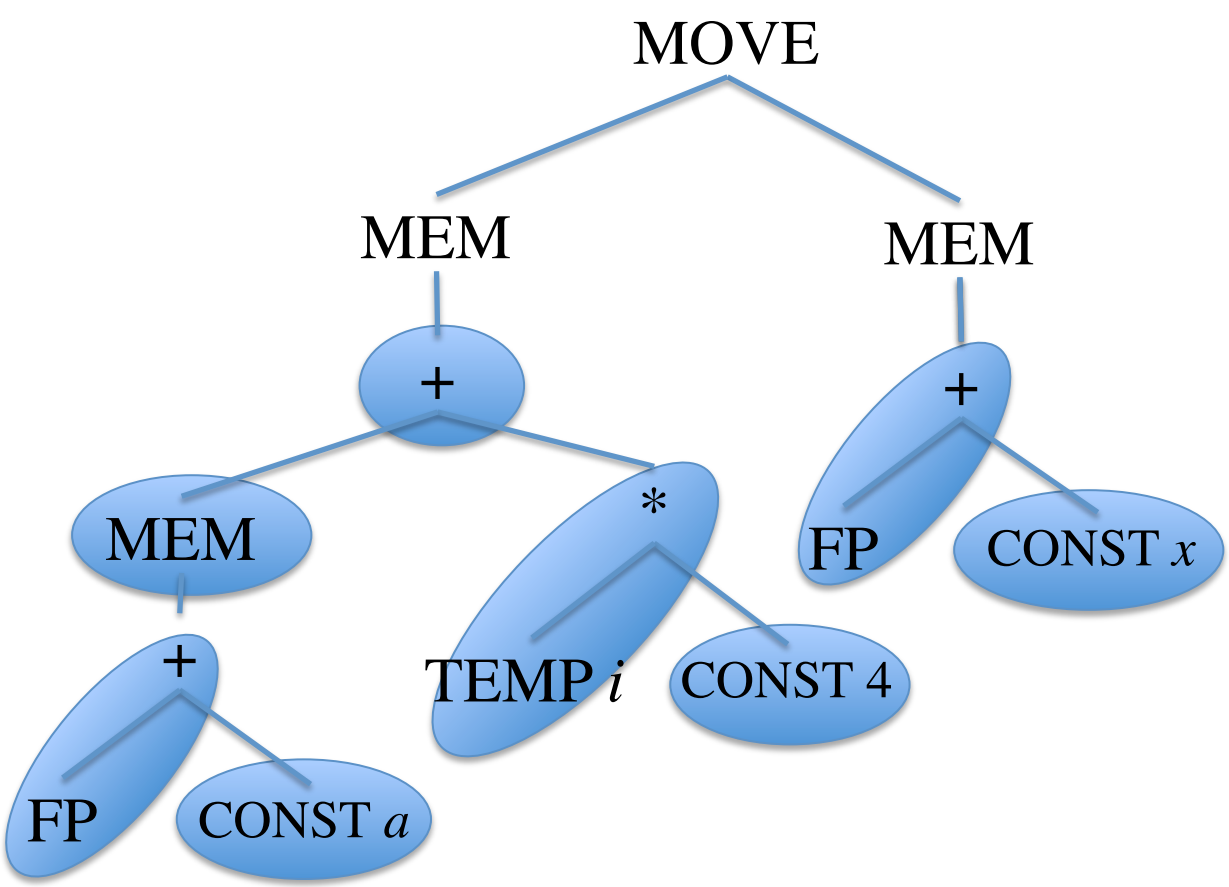
MUL $r2 \leftarrow ri \times r2$

ADD $r1 \leftarrow r1 + r2$

ADDI $r2 \leftarrow r0 + x$

Seleção de Instruções

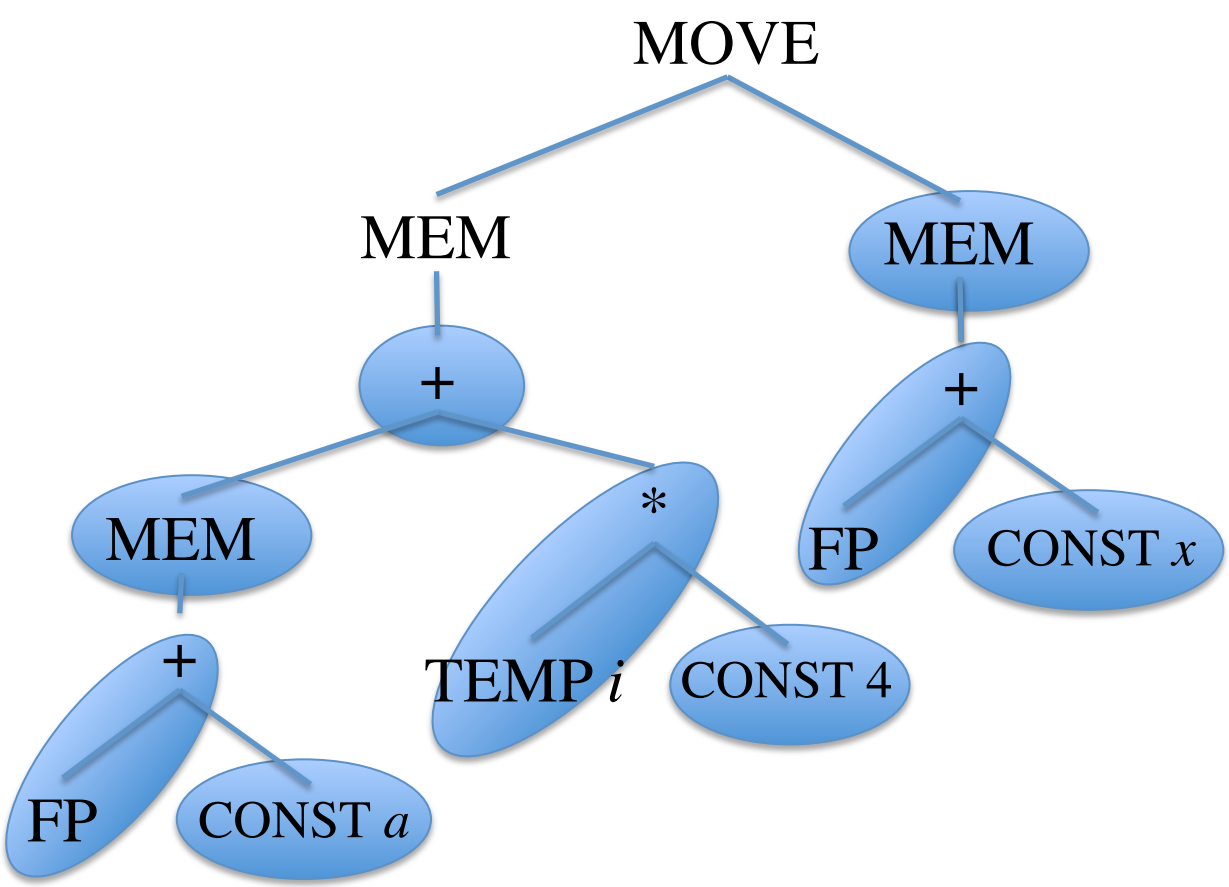
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI	$r1 \leftarrow r0 + a$
ADD	$r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$
LOAD	$r1 \leftarrow M[r1 + 0]$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + 4$
MUL	$r2 \leftarrow ri \times r2$
ADD	$r1 \leftarrow r1 + r2$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + x$
ADD	$r2 \leftarrow \mathbf{fp} + r2$

Seleção de Instruções

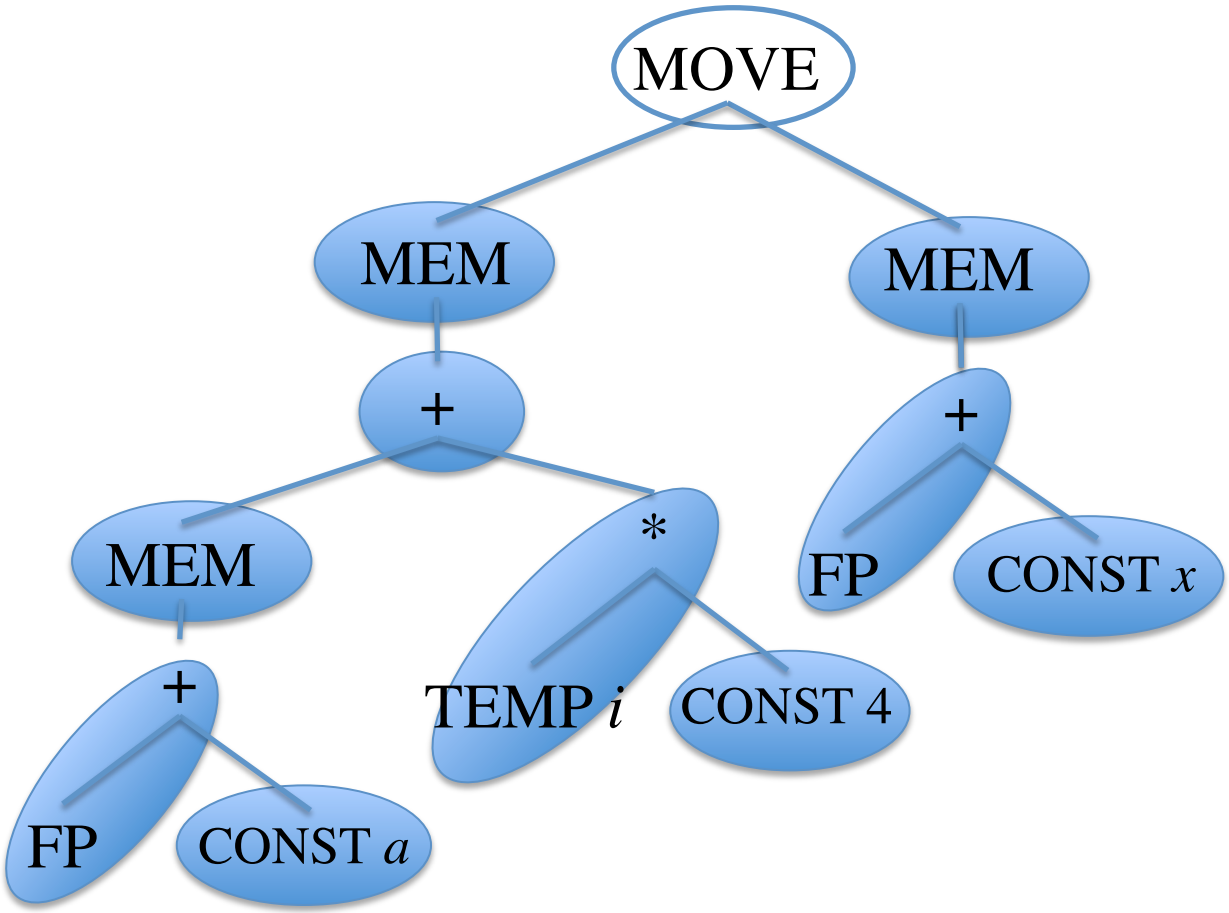
- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI $r1 \leftarrow r0 + a$
ADD $r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$
LOAD $r1 \leftarrow M[r1 + 0]$
ADDI $r2 \leftarrow r0 + 4$
MUL $r2 \leftarrow ri \times r2$
ADD $r1 \leftarrow r1 + r2$
ADDI $r2 \leftarrow r0 + x$
ADD $r2 \leftarrow \mathbf{fp} + r2$
LOAD $r2 \leftarrow M[r2 + 0]$

Seleção de Instruções

- E se cobrirmos a árvore com padrões simples (de um nó apenas)?



ADDI	$r1 \leftarrow r0 + a$
ADD	$r1 \leftarrow \mathbf{fp} + r1$
LOAD	$r1 \leftarrow M[r1 + 0]$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + 4$
MUL	$r2 \leftarrow ri \times r2$
ADD	$r1 \leftarrow r1 + r2$
ADDI	$r2 \leftarrow r0 + x$
ADD	$r2 \leftarrow \mathbf{fp} + r2$
LOAD	$r2 \leftarrow M[r2 + 0]$
STORE	$M[r1 + 0] \leftarrow r2$

Optimal e *Optimum*

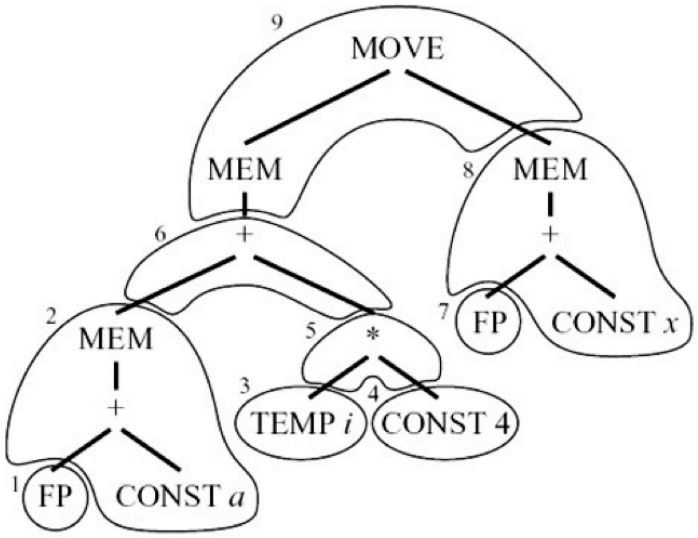
- Queremos a cobertura que nos traga o menor custo
  - Normalmente a menor
  - Caso as instruções tenham latências diferentes
    - A de menor tempo total
- Cada instrução recebe um custo
  - A melhor cobertura da árvore é a que a soma dos custos dos padrões utilizados é a menor possível
  - Este é o *optimum*

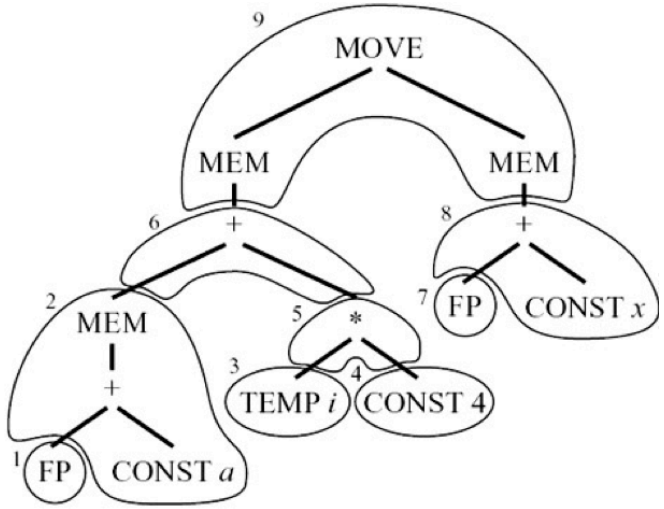
Optimal e *Optimum*

- Uma cobertura onde nenhum par de padrões adjacentes possa ser combinado em um par de menor custo é *optimal*
- Caso haja um padrão que possa ser quebrado e diminua o custo total, ele deve ser descartado
- *Optimum* é sempre *optimal*
- *Optimal* nem sempre é *optimum*

Optimal e *Optimum*

- No exemplo anterior assuma:
  - MOVEM tem custo m
  - Todas as outras têm custo 1
  - O que acontece com as duas coberturas se
    - m = 0, 1 ou 2?





Algoritmos

- Achar coberturas “optimais” é mais fácil
- CISC
  - Dada a complexidade das instruções, os padrões costumam ser grandes
  - A diferença entre *optimal* e *optimum* se torna mais considerável
- RISC
  - Instruções simples levam a padrões pequenos
  - Custo costuma ser mais uniforme
  - A diferença entre *optimal* e *optimum* praticamente desaparece

Maximal Munch

- Encontra cobertura *optimal*
- Bastante simples
  - Inicie na raiz
  - Encontre o maior padrão que possa ser encaixado nesse nó
    - Cubra o raiz e provavelmente outros nós
  - Repita o processo para cada sub-árvore a ser coberta
- A cada padrão selecionado, uma instrução é gerada
- Ordem inversa da execução! A raiz é a última a ser executada

Maximal Munch

- Algumas observações
  - O maior padrão é aquele com maior número de nós
  - Se dois padrões do mesmo tamanho encaixam, a escolha é arbitrária
- Facilmente implementado através de funções recursivas
  - Ordene as cláusulas com a prioridade de tamanho dos padrões
  - Se para cada tipo de nó da árvore existir um padrão de cobertura de um nó, nunca pode ficar travado.

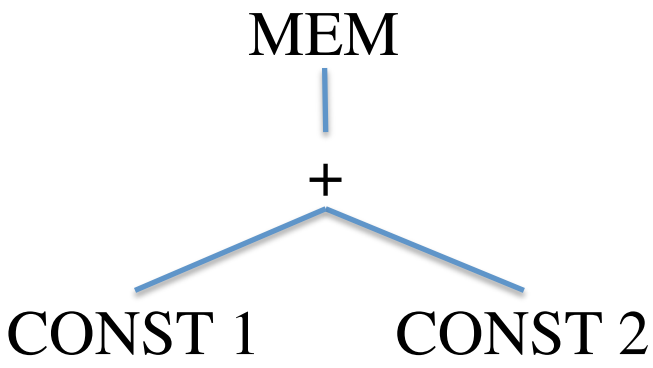
Maximal Munch

- Faça a cobertura Maximal Munch das seguintes árvores:
  - MOVE(MEM(+(+(CONST*1000*, MEM(TEMP*x*)), TEMP*fp*)), CONST*0*)
  - BINOP(MUL, CONST*5*, MEM(CONST*100*))

Programação Dinâmica

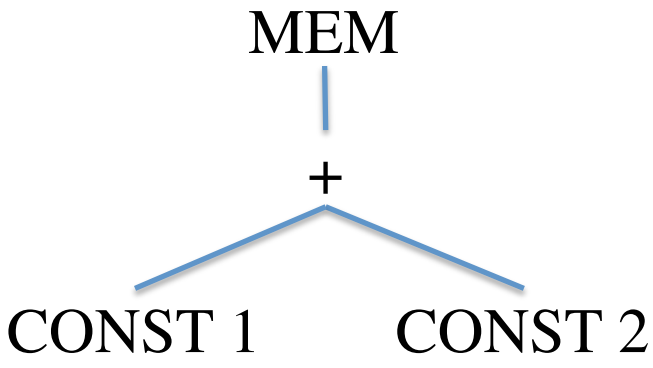
- Encontra um cobertura ótima (*optimum*)
- PD monta uma solução ótima baseada em soluções ótimas de sub-problemas
- O algoritmo atribui um custo a cada nó da árvore
  - A soma do custo de todas as instruções da melhor cobertura da sub-árvore com raiz no respectivo nó
  - Para um dado nó n
    - Encontra o melhor custo para suas sub-árvores
    - Analisa os padrões que podem cobrir n
    - Algoritmo bottom-up

Programação Dinâmica



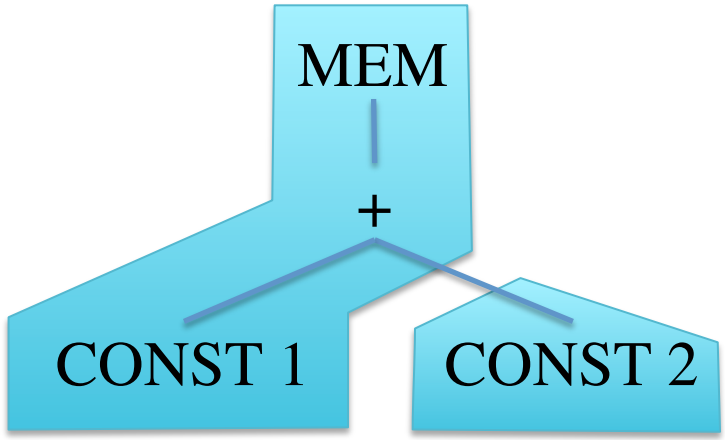
Tile	Instruction	Tile Cost	Leaves Cost	Total Cost
+	ADD	1	1+1	3
+ CONST	ADDI	1	1	2
+ CONST	ADDI	1	1	2

Programação Dinâmica



Tile	Instruction	Tile Cost	Leaves Cost	Total Cost
MEM |	LOAD	1	2	3
MEM | + CONST	LOAD	1	1	2
MEM | + CONST	LOAD	1	1	2

Programação Dinâmica

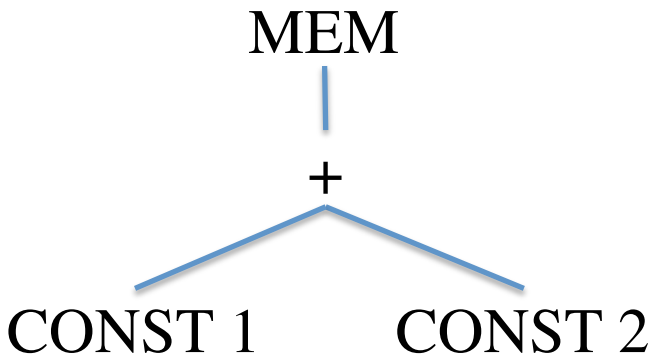


Tile	Instruction	Tile Cost	Leaves Cost	Total Cost
MEM |	LOAD	1	2	3
MEM | + / \ CONST	LOAD	1	1	2
MEM | + / \ CONST	LOAD	1	1	2

Programação Dinâmica

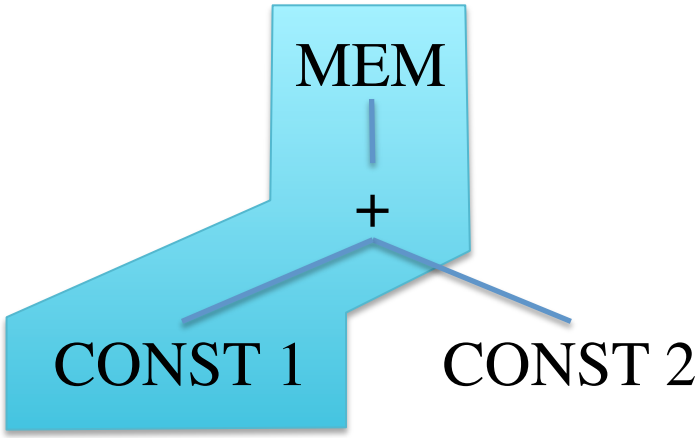
- Após computar o custo da raiz, emitir as instruções
- Emissão(n)
  - Para cada folha f do padrão de árvore selecionado para o nó n, execute emissão(f) recursivamente.
  - Emita a instrução do padrão de n
- A emissão de código é feita através da chamada
  - Emissão(raiz)

Programação Dinâmica



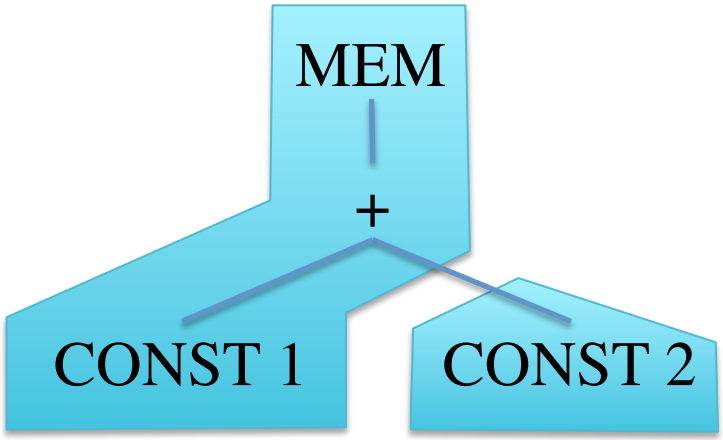

```
Emissão(MEM)
```

Programação Dinâmica



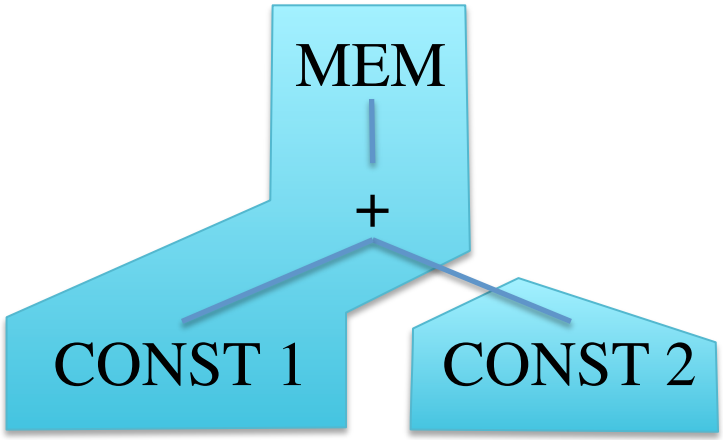

```
Emissão(MEM)
   Emissão(CONST 2)
```

Programação Dinâmica




```
Emissão(MEM)
  Emissão(CONST 2)
    Emite: ADDI r1 := r0 + 2
```

Programação Dinâmica




```
Emissão(MEM)
  Emissão(CONST 2)
    Emite: ADDI r1 := r0 + 2
  Emite: LOAD r1 := M[r1 + 1]
```

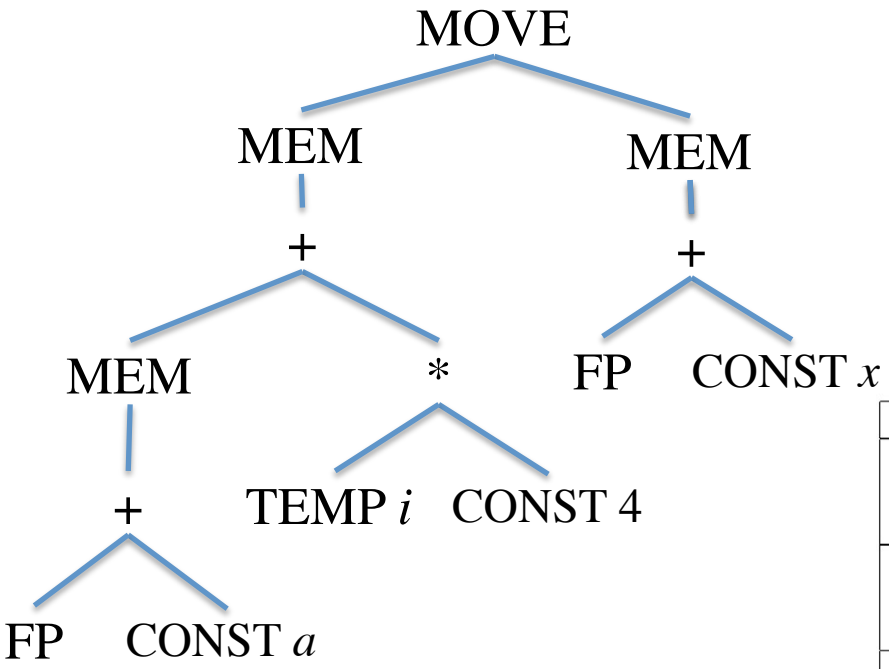
Comentários sobre Eficiência

- Seja:
  - T: números de padrões diferentes
  - K: no. médio de nós não-folhas dos padrões casados
  - K': maior # de nós a serem olhados para identificar quais padrões casam a uma dada sub-árvore. Aprox. o tamanho do maior padrão
  - T': média de padrões diferentes que casam em cada nó
  - N: # nós da árvore
  - RISC típico:
    - T=50, K=2, K'=4, T'=5
- *Maximal Munch*: N/K * (K'+ T')
- Programação Dinâmica: N * (K'+ T')
  - Requer duas passadas na árvore

Comentários sobre Eficiência

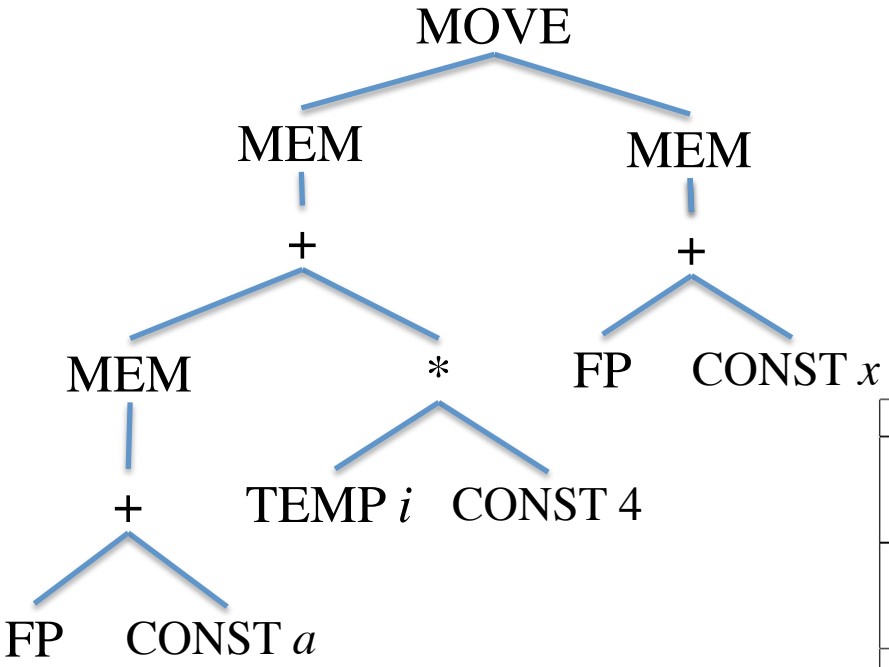
- Ambos são lineares
- Seleção de instruções é bastante rápida comparada com outras fases da compilação
- Até analise léxica pode ser mais demorada

Exemplo: *Maximal Munch*



Name	*Effect*	*Trees*
—	r_i	TEMP
ADD	$r_i \leftarrow r_j + r_k$	+
MUL	$r_i \leftarrow r_j \times r_k$	*
SUB	$r_i \leftarrow r_j - r_k$	-
DIV	$r_i \leftarrow r_j / r_k$	/
ADDI	$r_i \leftarrow r_j + c$	+ CONST, + CONST, CONST
SUBI	$r_i \leftarrow r_j - c$	- CONST
LOAD	$r_i \leftarrow M[r_j + c]$	MEM + CONST, MEM + CONST, MEM CONST, MEM
STORE	$M[r_j + c] \leftarrow r_i$	MOVE MEM + CONST CONST, MOVE MEM + CONST, MOVE MEM CONST, MOVE MEM
MOVEM	$M[r_j] \leftarrow M[r_i]$	MOVE MEM MEM

Exemplo: PD



Name	*Effect*	*Trees*
—	r_i	TEMP
ADD	$r_i \leftarrow r_j + r_k$	+
MUL	$r_i \leftarrow r_j \times r_k$	*
SUB	$r_i \leftarrow r_j - r_k$	-
DIV	$r_i \leftarrow r_j / r_k$	/
ADDI	$r_i \leftarrow r_j + c$	+ CONST; + CONST; CONST
SUBI	$r_i \leftarrow r_j - c$	- CONST
LOAD	$r_i \leftarrow M[r_j + c]$	MEM + CONST; MEM + CONST; MEM CONST; MEM
STORE	$M[r_j + c] \leftarrow r_i$	MOVE MEM + CONST CONST; MOVE MEM + CONST; MOVE MEM CONST; MOVE MEM
MOVEM	$M[r_j] \leftarrow M[r_i]$	MOVE MEM MEM