# Aula 7

- Sub-rotinas: evocação e retorno
- Caraterização das sub-rotinas na perspetiva do "chamador" e do "chamado"
- Convenções adotadas quanto à:
  - passagem de parâmetros para sub-rotinas
  - devolução de valores de sub-rotinas
  - salvaguarda de registos: "caller-saved" *versus* "callee-saved"

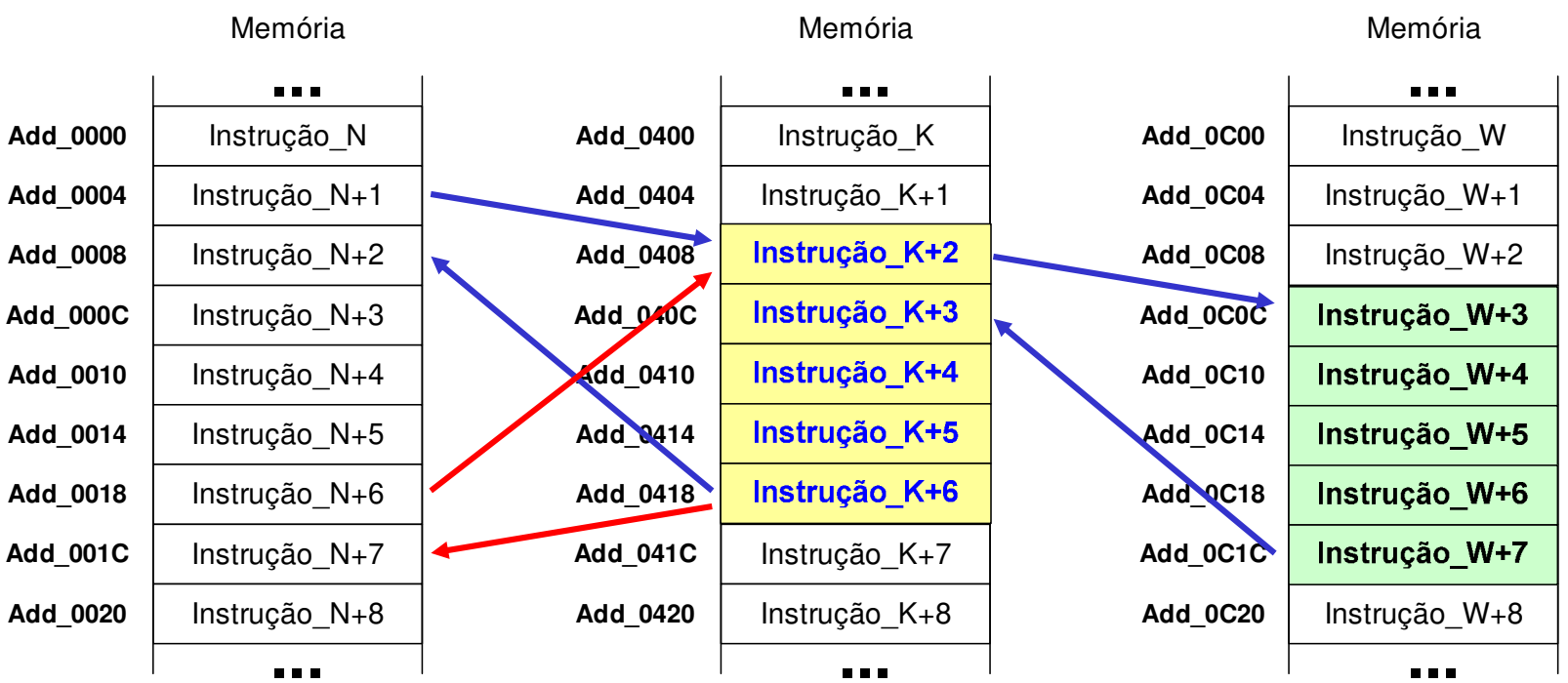
José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Arnaldo Oliveira, Pedro Lavrador

# Porque se usam funções (sub-rotinas)?

- Há três razões principais que justificam a existência de funções*:
  - A **reutilização no contexto de um determinado programa** - aumento da eficiência na dimensão do código, substituindo a repetição de um mesmo trecho de código por um único trecho evocável de múltiplos pontos do programa
  - A **reutilização no contexto de um conjunto de programas**, permitindo que o mesmo código possa ser reaproveitado (bibliotecas de funções)
  - A **organização e estruturação do código**

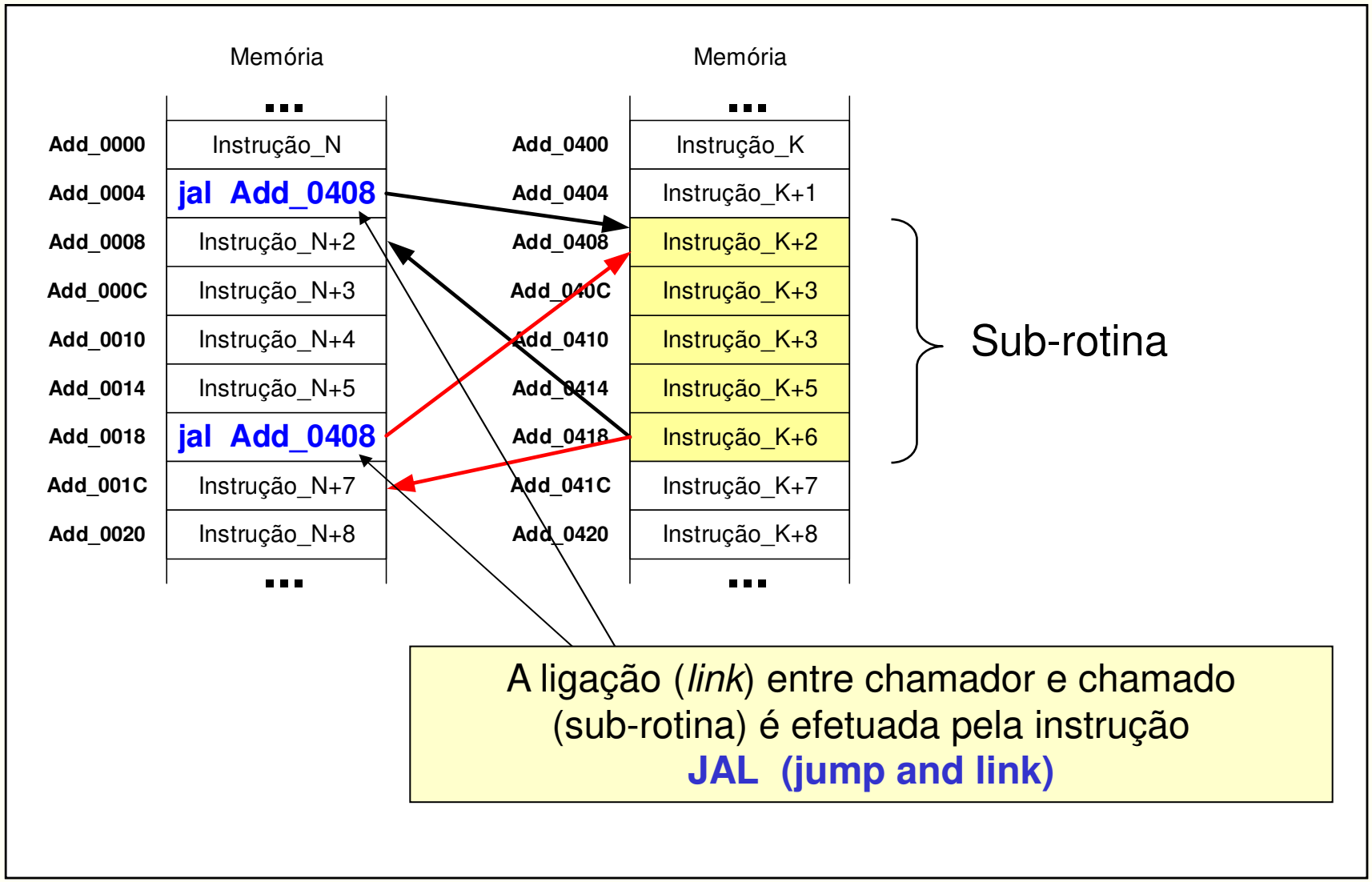
(*) No contexto da linguagem *Assembly*, as funções e os procedimentos são genericamente conhecidas por **sub-rotinas**!

# Sub-rotinas: exemplo



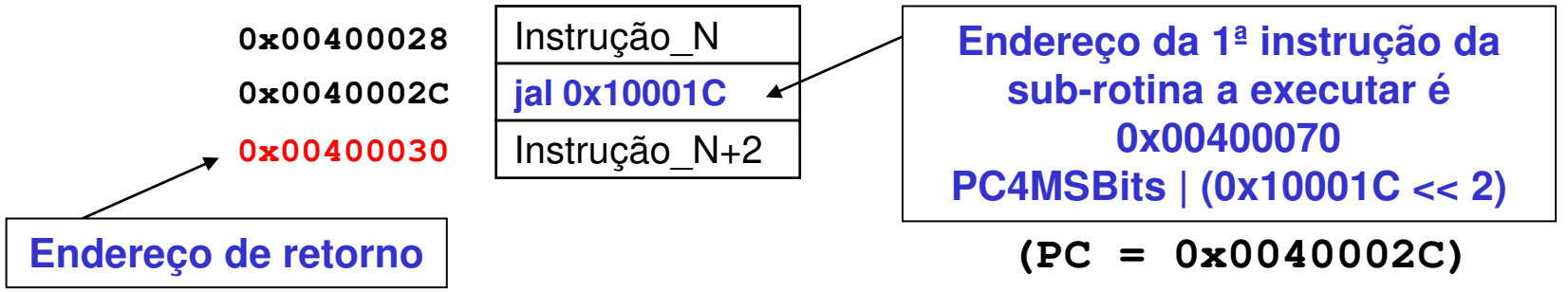

**Como implementar o esquema de chamada e retorno de uma sub-rotina?**

# Sub-rotinas: instrução JAL



# Ciclo de execução da instrução JAL

- **jal *target_address***




Fase *fetch*

```
IR = MEM[PC]        → IR = jal 0x10001C
PC = PC + 4         → PC = 0x00400030
                    target_address = 0x00400070
```

Fase *execute*

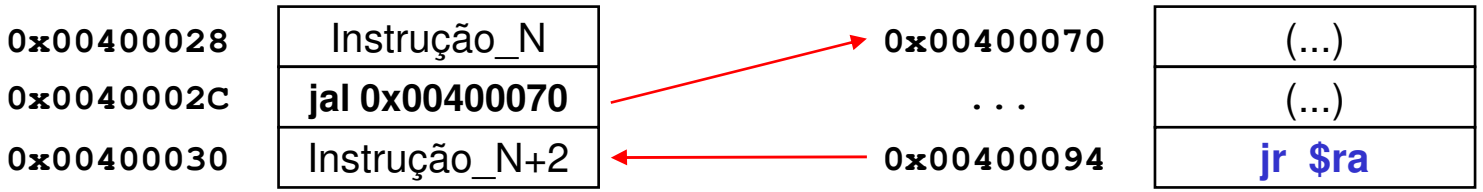
```
$ra = PC            → $ra = 0x00400030
PC=target_address   → PC = 0x00400070
```

O registo **$ra ($31)** armazena o endereço de retorno

A próxima instrução a ser executada está no endereço **0x00400070**

# Ciclo de execução da instrução JR

- Como **regressar** à instrução que sucede à instrução "**jal**" ?
- Aproveita-se o endereço de retorno armazenado em **$ra** durante a execução da instrução "**jal**" (instrução "**jr *register***")




```
PC = 0x00400094
$ra = 0x00400030
```

Fase *fetch*

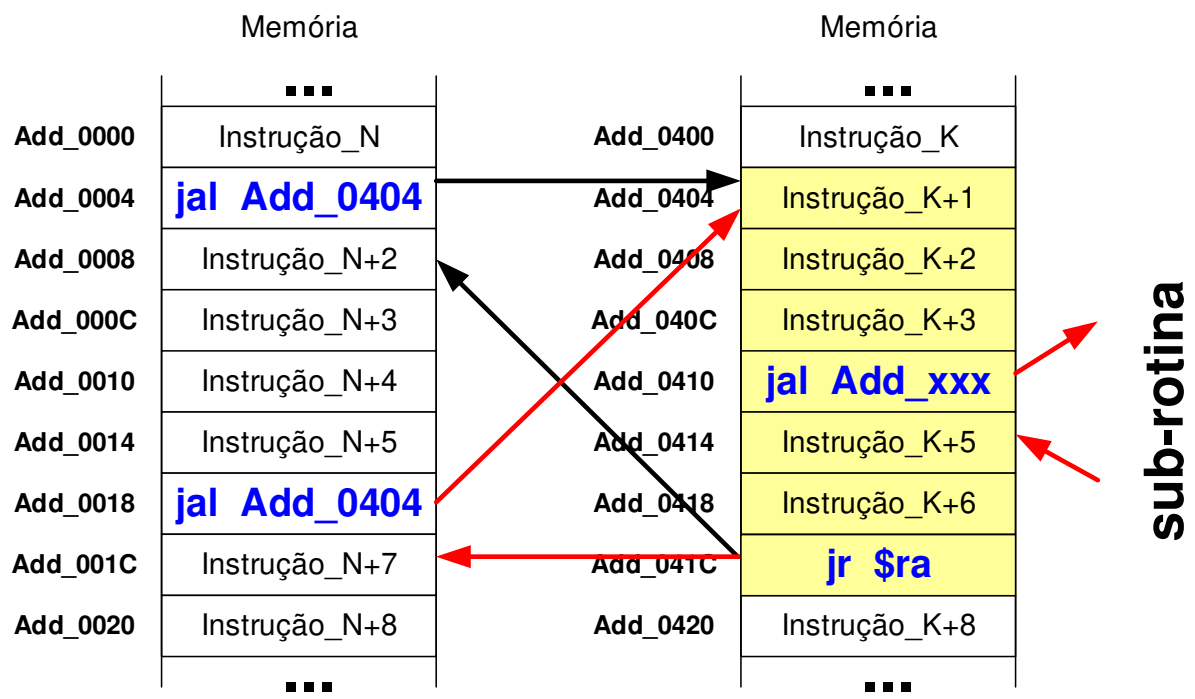
```
IR = MEM[PC]      ⟶   IR = jr $ra
PC = PC + 4       ⟶   PC = 0x00400098
```

Fase *execute*

```
PC = $ra          ⟶   PC = 0x00400030
```

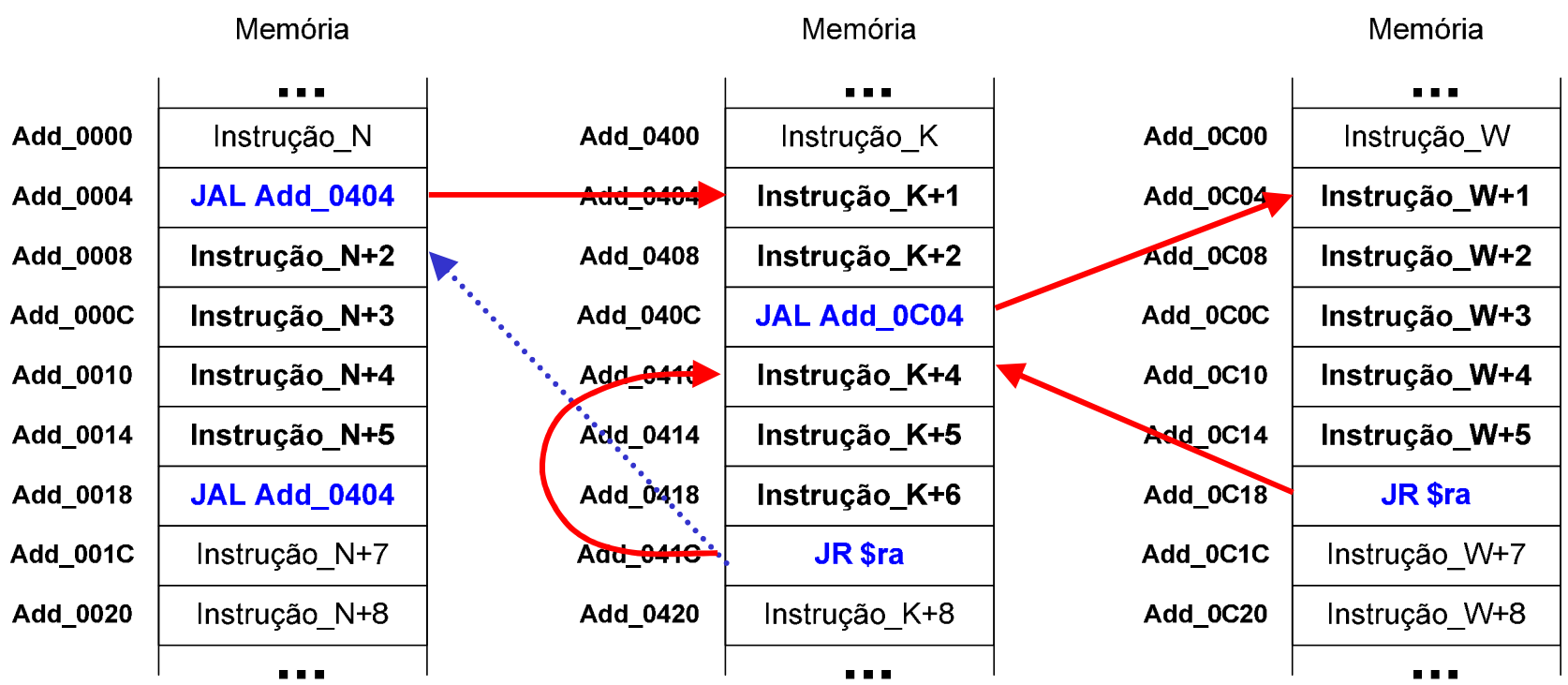
A próxima instrução a ser executada está no endereço **0x00400030**

# Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina



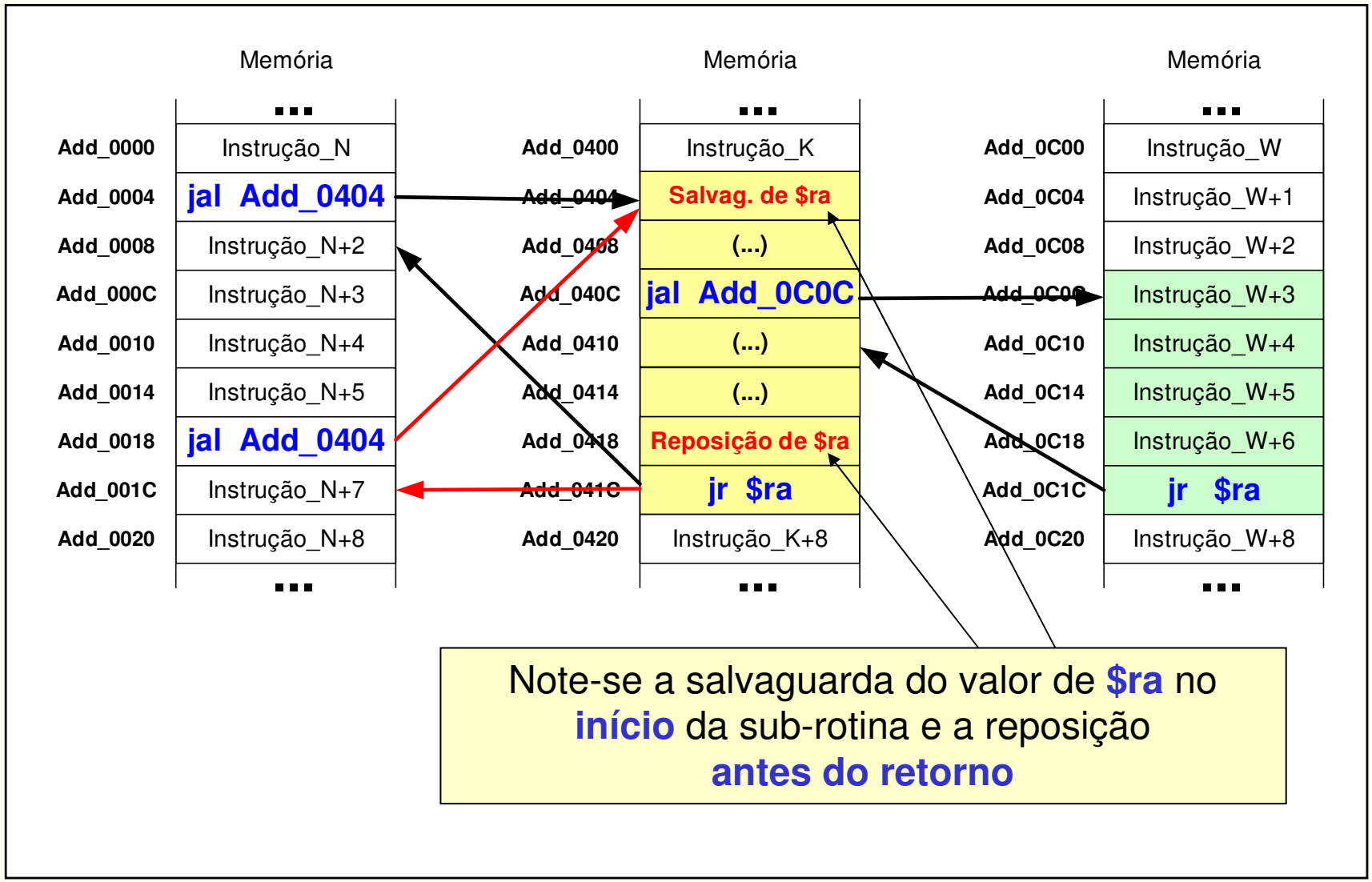

E se a sub-rotina (Instrução_K+1 a “jr $ra”) chamar uma 2ª sub-rotina?

# Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina




- No caso em que a sub-rotina chama uma 2ª sub-rotina, o valor do registo **$ra** é alterado (pela instrução "**jal**"), perdendo-se a ligação para o primeiro chamador. **Como resolver este problema?**

# Chamada a uma sub-rotina a partir de outra sub-rotina

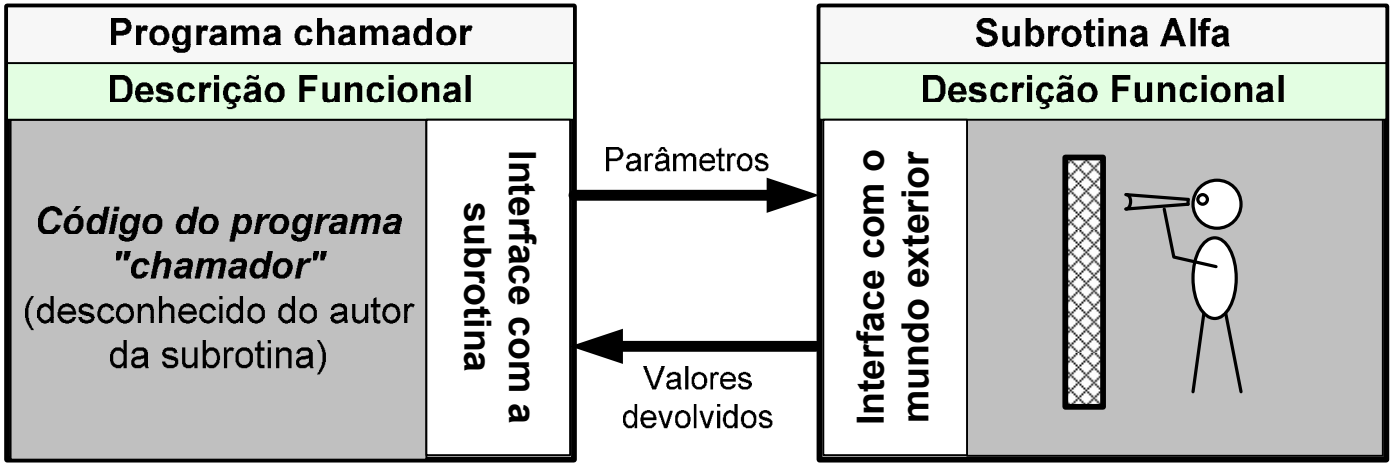


# Sub-rotinas – perspetiva do utilizador (programador)

- A **reutilização das sub-rotinas** torna-as particularmente atrativas, em especial quando suportam funcionalidades básicas, quer do ponto de vista computacional como do ponto de vista do interface entre o computador, os periféricos e o utilizador humano
- As sub-rotinas surgem, assim, frequentemente agrupadas em **bibliotecas**, a partir das quais podem ser evocadas por qualquer programa externo
- Este facto determina que o recurso a sub-rotinas escritas por outros para serviço dos nossos programas, **não deverá implicar necessariamente o conhecimento dos detalhes da sua implementação**
- Geralmente, o acesso ao código fonte da sub-rotina (conjunto de instruções originalmente escritas pelo programador) não é sequer possível, a menos que o mesmo seja tornado público pelo seu autor

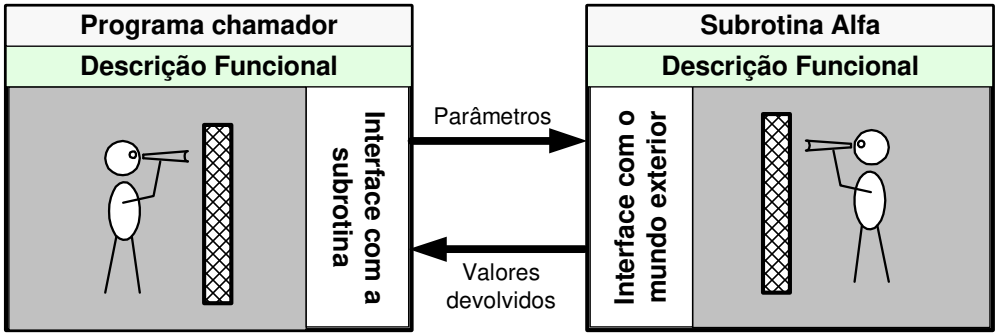
# Sub-rotinas – perspetiva do programador

- Na perspetiva do programador, a sub-rotina que este tem a responsabilidade de escrever é um **trecho de código isolado**, com uma funcionalidade bem definida, e com um interface que ele próprio pode determinar em função das necessidades
- O facto de a sub-rotina ter de ser escrita para ser reutilizada implica que o programador não conhece antecipadamente as caraterísticas do programa que irá evocar o seu código



# Regras a definir entre chamador e a sub-brotina chamada

- Torna-se assim óbvia a necessidade de definir um conjunto de **regras que regulem a relação entre o programa "chamador" e a sub-rotina "chamada"**: a) definição do interface entre ambos e b) princípios que assegurem uma "sã convivência" entre os dois!



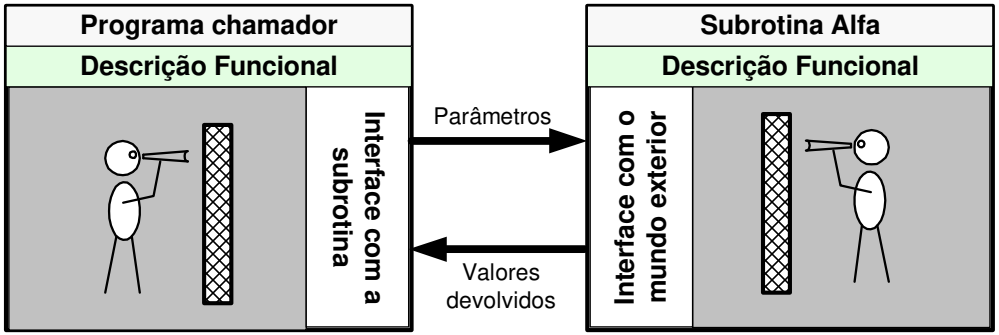

Exemplo

```
        ...
        li      $t0,0
l1:     bge     $t0,5,endf1
        ...
        jal     sub1
        ...
        addi    $t0,$t0,1
        j       l1
endf1:  ...
```

**Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?**

# Regras a definir entre chamador e a sub-brotina chamada

- Torna-se óbvia a necessidade de definir um conjunto de **regras que regulem a relação entre o programa "chamador" e a sub-rotina "chamada"**: a) definição do interface entre ambos e b) princípios que assegurem uma "sã convivência" entre os dois!




Exemplo

```
        ...
        li      $t0,0
l1:     bge     $t0,5,endf1
        ...
        jal     sub1
        ...
        addi    $t0,$t0,1
        j       l1
endf1:  ...
```

```
sub1:   li      $t0,3
l2:     ble     $t0,0,endf2
        ...
        addi    $t0,$t0,-1
        j       l2
endf2:  jr      $ra
```

**Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?**

# Regras a definir entre chamador e a sub-brotina chamada

- Ao nível do interface:
  - Como **passar parâmetros** do “chamador” para o “chamado”, quantos e onde
  - Como **receber**, do lado do “chamador”, **valores devolvidos** pelo “chamado”
- Ao nível das regras de “sã convivência”:
  - Que registos do CPU podem “chamador” e “chamado” usar, sem que haja alteração indevida de informação (por exemplo um alterar o conteúdo de um registo que está simultaneamente a ser usado pelo outro)
  - Como partilhar a memória usada para armazenar dados, sem risco de sobreposição (e consequente perda de informação armazenada)

# Convenção para a passagem de parâmetros no MIPS

- Os parâmetros que possam ser armazenados na dimensão de um registo (32 bits, i.e., **char**, **int**, **ponteiros**) devem ser passados à sub-rotina nos registos **$a0 a $a3** ($4 a $7) por esta ordem
  - o **primeiro parâmetro sempre em $a0**, o **segundo em $a1** e assim sucessivamente
- *Caso o número de parâmetros a passar nos registos $ai seja superior a quatro, os restantes (pela ordem em que são declarados) deverão ser passados na stack*
- No caso de um ou mais parâmetros serem do **tipo float ou double**, os registos utilizados para os passar serão os registos **$f12 e $f14** do co-processador de vírgula flutuante (ponteiros são passados nos registos $ai)

# Convenção para a devolução de valores no MIPS

- A sub-rotina pode devolver um valor de 32 bits ou um de 64 bits:
  - Se o valor a devolver é de **32 bits** é utilizado o registo **$v0**
  - Se o valor a devolver é de **64 bits**, são utilizados os registos **$v1 (32 bits mais significativos) e $v0 (32 bits menos significativos**)
- No caso de o valor a devolver ser do tipo **float ou double**, o registo a utilizar será o registo **$f0** do co-processador de vírgula flutuante

# Exemplo (chamador)

```
int max(int, int);

void main(void)
{
    static int maxVal;
    maxVal = max(19, 35);
}
```

Em *Assembly*:

```
        .data
maxVal:.space 4
        .text
main:   (...)   # Salvag. $ra
        li      $a0, 19
        li      $a1, 35
        jal     max
        la      $t0, maxVal
        sw      $v0, 0($t0)
        (...)   # Repõe $ra
        jr      $ra
```

**Note-se que, para escrever o programa "chamador", não é necessário conhecer os detalhes de implementação da sub-rotina**

parâmetros

evocação da sub-rotina

valor devolvido

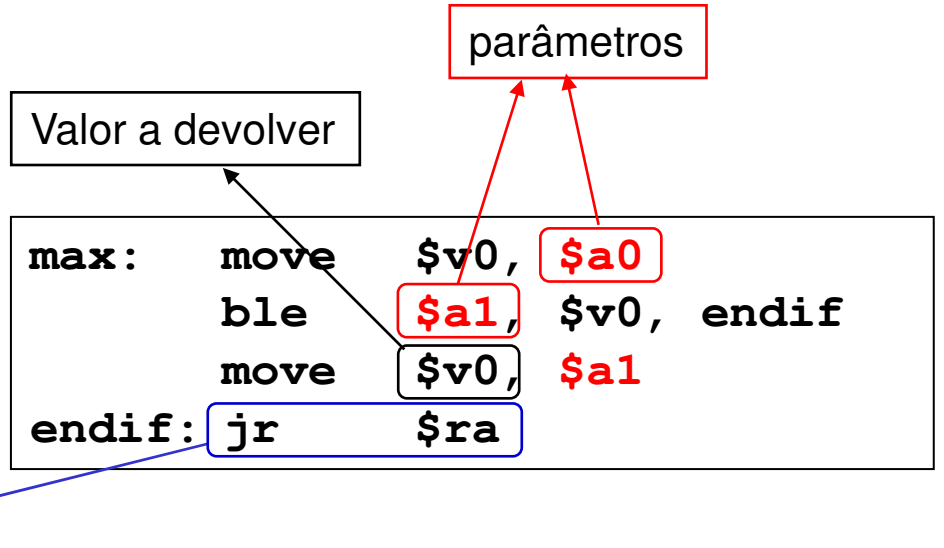
# Exemplo (sub-rotina)

```
int max(int a, int b)
{
     int vmax = a;

     if(b > vmax)
        vmax = b;
     return vmax;
}
```

**Note-se que , para escrever o código da sub-rotina, não é necessário conhecer os detalhes de implementação do "chamador"**

Em *Assembly*:




**Será necessário salvaguardar o valor de $ra?**

# Estratégias para a salvaguarda de registos

- Que registos pode usar uma sub-rotina, sem que se corra o risco de que os mesmos registos estejam a ser usados pelo programa "chamador", potenciando assim a destruição de informação vital para a execução do programa como um todo?
- Uma hipótese seria dividir, de forma estática, os registos existentes entre "chamador" e "chamado"! Nesse caso, o que fazer quando o "chamado" é simultaneamente "chamador" (sub-rotina que chama outra sub-rotina)?
- Outra hipótese, mais praticável, consiste em atribuir a um dos "parceiros" a responsabilidade de copiar previamente para a memória externa o conteúdo de qualquer registo que pretenda utilizar (**salvaguardar o registo**) e repor, posteriormente, o valor original lá armazenado

# Estratégias para a salvaguarda de registos

- Estratégia “**caller-saved**”
  - Deixa-se ao cuidado do programa “chamador” a responsabilidade de salvaguardar o conteúdo da totalidade dos registos antes de evocar a sub-rotina
  - Cabe-lhe também a tarefa de repor posteriormente o seu valor
  - No limite, é admissível que o "chamador" salvaguarde apenas o conteúdo dos registos de que venha a precisar mais tarde
- Estratégia “**callee-saved**”
  - Entrega-se à sub-rotina a responsabilidade pela prévia salvaguarda dos registos de que possa necessitar
  - Assegura, igualmente, a tarefa de repor o seu valor imediatamente antes de regressar ao programa “chamador”

# Convenção para salvaguarda de registos no MIPS

- No caso do MIPS, a estratégia adotada é uma versão mista das anteriores, e baseia-se nas duas regras seguintes:
  - Os registos **$t0..$t9**, **$v0..$v1** e **$a0..$a3** podem ser livremente utilizados e alterados pelas sub-rotinas
  - Os valores dos registos **$s0..$s7** não podem, **na perspetiva do chamador**, ser alterados pelas sub-rotinas
- Então, se os registos **$t0..$t9**, **$v0..$v1** e **$a0..$a3** podem ser livremente utilizados e alterados pelas sub-rotinas
  - Um programa "chamador" que esteja a usar um ou mais destes registos, deverá salvaguardar o seu conteúdo antes de evocar uma sub-rotina, sob pena de que esta os venha a alterar

# Convenção para salvaguarda de registos no MIPS

- Os valores dos registos **$s0..$s7** não podem, na perspetiva do chamador, ser alterados pelas sub-rotinas
  - Se uma dada sub-rotina precisar de usar um registo do tipo **$sn**, compete a essa sub-rotina **copiar previamente o seu conteúdo** para um lugar seguro (memória externa), repondo-o imediatamente antes de terminar
  - Dessa forma, do ponto de vista do programa "chamador" (que não "vê" o código da sub-rotina) é como se esse registo não tivesse sido usado ou alterado

# Considerações práticas sobre a utilização da convenção

- **sub-rotinas terminais** (sub-rotinas folha, i.e., que não chamam qualquer sub-rotina)
  - Só devem utilizar (preferencialmente) registos que não necessitam de ser salvaguardados (**$t0..$t9**, **$v0..$v1** e **$a0..$a3**)

- **sub-rotinas que chamam outras sub-rotinas**
  - Devem utilizar os registos **$s0..$s7** para o armazenamento de valores que se pretenda preservar. A utilização destes registos implica a sua prévia salvaguarda na memória externa logo no início da sub-rotina e a respetiva reposição no final
  - Devem utilizar os registos $t0..$t9, $v0..$v1 e $a0..$a3 para os restantes valores

# Utilização da convenção - exemplo

- O problema detetado na codificação do programa chamador e da sub-rotina dos slides 12 e 13 pode facilmente ser resolvido se a convenção de salvaguarda de registos for aplicada
- A variável índice do ciclo do programa chamador passará a residir num registo **$sn** (por exemplo no $s0) – registo que, **garantidamente**, a sub-rotina não vai alterar

O código da subrotina é desconhecido do programador do "programa chamador" e vice-versa

```
        (...)   # Salv. $s0
        ...
        li      $s0,0
l1:     bge     $s0,5,endf1
        ...
        jal     sub1
        ...
        addi    $s0,$s0,1
        j       l1
endf1:  ...
        (...)   # Repoe $s0
```

```
sub1:   li      $t0,3
l2:     ble     $t0,0,endf2
        ...
        addi    $t0,$t0,-1
        j       l2
endf2:  jr      $ra
```

**Quantas vezes vai ser executado o ciclo do programa chamador?**