

**Instituto de
Computação**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Organização Básica de computadores e linguagem de montagem

**Arquivos executáveis, objetos e programas
em linguagem de montagem**

Prof. Edson Borin

<https://www.ic.unicamp.br/~edson>

Institute of Computing - UNICAMP

Codificação de programas

- Programas podem ser codificados de diversas formas.
 - Ex: programa nativo, programa fonte, script, java bytecode, ...;
- **Programa nativo:** programas que podem ser executados diretamente pela CPU do computador, ou seja, que são codificados com instruções que a CPU entende!

Agenda

- **Geração de programas nativos**
- Rótulos e símbolos
- Referências e relocação
- Símbolos globais vs locais
- Ponto de entrada
- Organização do programa em seções
- Arquivos objetos vs executáveis

Geração de programas nativos

- **Compilador:** Converte programas de ling. de alto nível para linguagem de montagem.
 - Programas em alto nível e em linguagem de montagem são representados em arquivos texto!
- **Montador:** Converte programas em ling. de montagem para linguagem de máquina.
 - Produz um arquivo objeto (.o)
 - Arquivos objeto possuem código em ling. de máquina e são codificados de forma binária!
- **Ligador:** Liga o código de vários arquivos objeto (.o) e produz um arquivo executável.

Geração de programas nativos

- **Exemplo**

```
int main()
{
    return func(10);
}
```

main.c

Arquivo main.c contém a função main(), que chama a função func().

```
int func(int a)
{
    return 42+a;
}
```


func.c

Arquivo func.c contém a implementação da função func();

Geração de programas nativos

- Exemplo

```
int main()
{
    return func(10);
}
main.c
```



```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
main.s
```

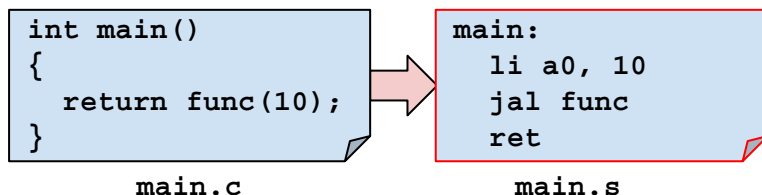
```
int func(int a)
{
    return 42+a;
}
func.c
```

Chamar o gcc para gerar o código em ling. de montagem p/ main.c

```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
```

Geração de programas nativos

- **Exemplo**



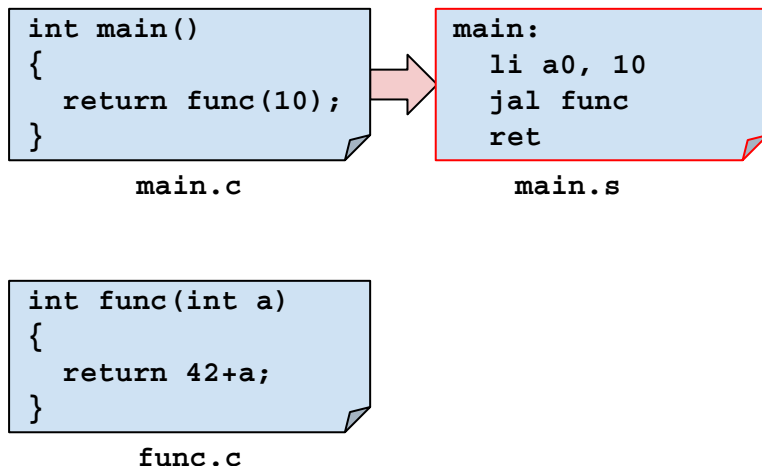
riscv64-unknown-elf-gcc: versão do compilador gcc que gera código para RISC-V.

```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
```

***Flag* que configura o GCC para gerar código para RV32I (versão de 32bits do RISC-V).**

Geração de programas nativos

- **Exemplo**



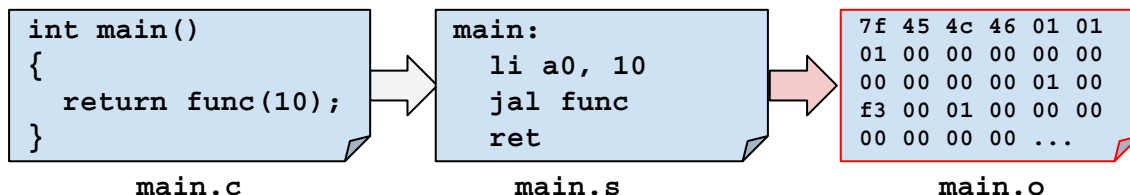
Flag '-o' especifica o nome do arquivo a ser produzido.

```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
```

Flag '-S' informa ao GCC para gerar código em linguagem de montagem (assembly).

Geração de programas nativos

- Exemplo



```
int func(int a)
{
    return 42+a;
}
```

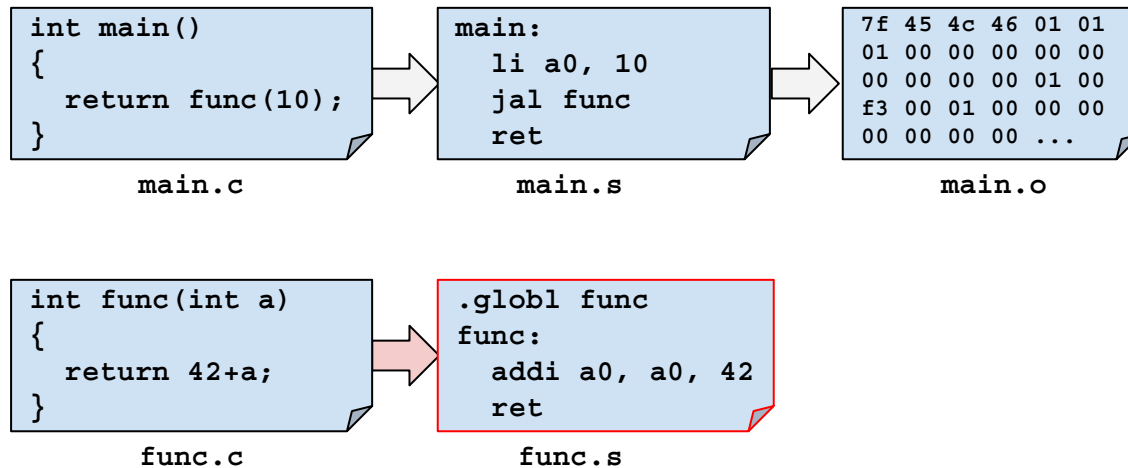
`func.c`

Chamar o montador da GNU (as) para montar o código em ling. de montagem

```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i main.s -o main.o
```

Geração de programas nativos

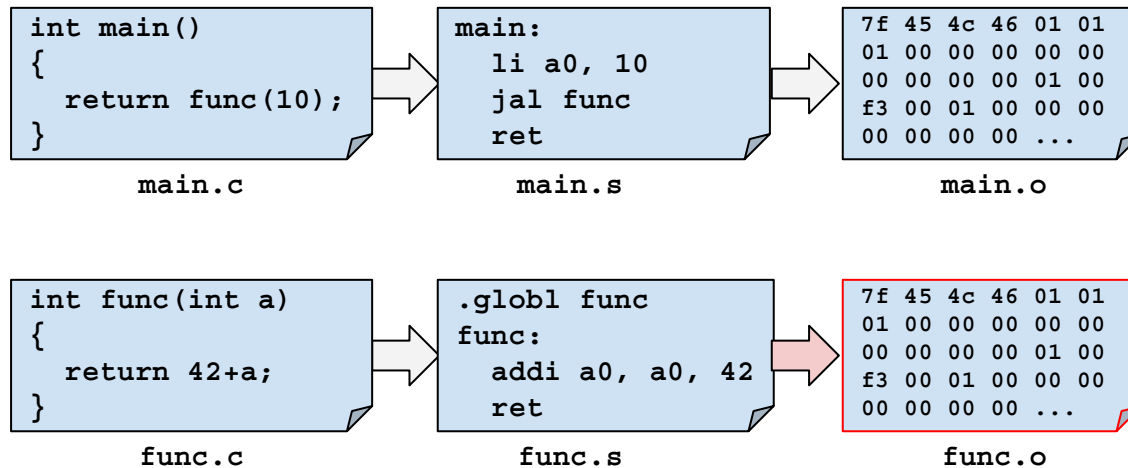
- Exemplo



```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S func.c -o func.s
```

Geração de programas nativos

- Exemplo

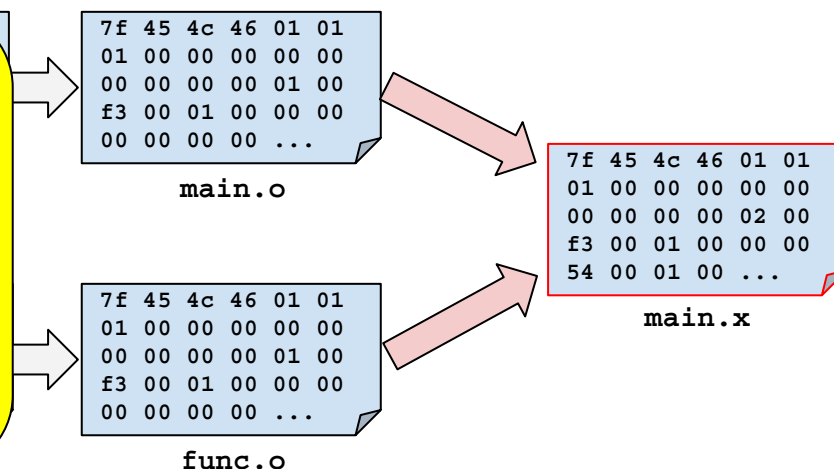


```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S func.c -o func.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i func.s -o func.o
```

Geração de programas nativos

- Exemplo

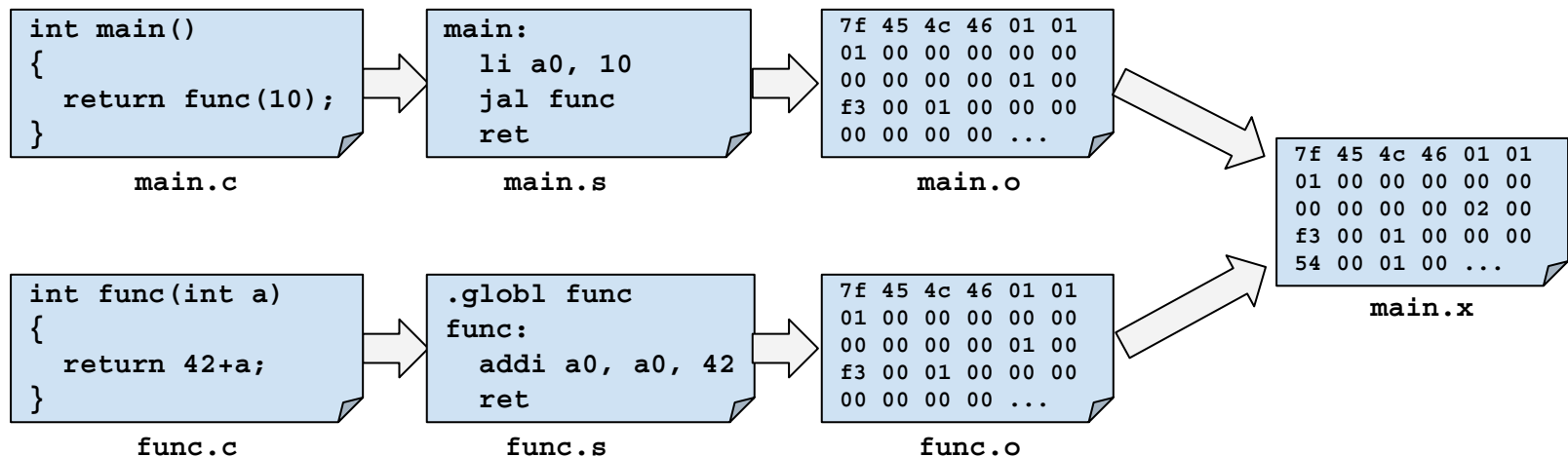
Chamar o ligador da GNU (ld) para ligar o código dos dois arquivos objeto.



```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S func.c -o func.s
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 000000000010054
```

Geração de programas nativos

- Exemplo



```
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S main.c -o main.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-gcc -mabi=ilp32 -march=rv32i -S func.c -o func.s
$ riscv64-unknown-elf-as -mabi=ilp32 -march=rv32i func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 000000000010054
```

Geração de programas nativos

- Linguagem de montagem
 - Linguagem simbólica => texto
 - Em inglês: *Assembly language*
- Arquivos texto:
 - sequências de bytes que representam caracteres;
 - o valor de cada byte depende do padrão de codificação (p.ex: UTF-8 ou ASCII).
 - o programa "hexdump" pode ser usado para imprimir os valores dos bytes de um arquivo qualquer.

```
$ hexdump main.s
00000000 6d 61 69 6e 3a 0a 20 20 6c 69 20 61 30 2c 20 31
00000010 30 0a 20 20 6a 61 6c 20 66 75 6e 63 0a 20 20 72
00000020 65 74 0a
00000023
```

```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

main.s

Geração de programas nativos

- Linguagem de montagem
 - Linguagem simbólica => texto
 - Em inglês: *Assembly language*
- Arquivos texto:
 - os comandos "cat" ou "less" do Linux podem ser usados para inspecionar o conteúdo de arquivos texto.
 - Eles mostram os caracteres em vez dos valores de cada byte.

```
$ cat main.s
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

main.s

Geração de programas nativos

- Linguagem de máquina
 - Sequência de bits que a CPU entende (arquivo binário)
 - Em inglês: *Machine language*
- Montador
 - Ferramenta que converte programa em linguagem de montagem para linguagem de máquina
 - Em inglês: *Assembler*
 - Código em linguagem de máquina produzido pelo montador é armazenado em um **arquivo objeto!**

Geração de programas nativos

Arquivo objeto

- Diversos formatos:
 - Unix/Linux:
 - a.out
 - COFF: Common Object File Format
 - **ELF: Executable and Linking Format**
 - Windows:
 - PE: Portable Executable
- Todos estes formatos podem ser usados para codificar tanto arquivos objeto quanto arquivos executáveis!
- Arquivo objeto e executáveis são arquivos binários!

Geração de programas nativos

- Linguagem de máquina
 - Sequência de bits que a CPU entende (arquivo binário)
 - Em inglês: *Machine language*
- **Arquivos binários**
 - podemos usar a ferramenta "hexdump" para mostrar o valor do bytes;

```
$ hexdump main.o
00000000 7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00000010 01 00 f3 00 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00000020 28 01 00 00 00 00 00 00 34 00 00 00 00 00 28 00
00000030 09 00 08 00 13 05 a0 00 ef f0 df ff 67 80 ...
```

```
7f 45 4c 46 01 01
01 00 00 00 00 00
00 00 00 00 01 00
f3 00 01 00 00 00
00 00 00 00 ...
```

main.o

Geração de programas nativos

- Linguagem de máquina
 - Sequência de bits que a CPU entende (arquivo binário)
 - Em inglês: *Machine language*
- **Arquivos binários**
 - Ferramentas especiais podem ser usadas para decodificar a informação de arquivos binários e mostrá-las de forma fácil de se visualizar.
 - a ferramenta "objdump" decodifica informações de arquivos objeto e mostra de forma textual!

```
$ riscv64-unknown-elf-objdump -d main.o
main.o:      file format elf32-littleriscv
Disassembly of section .text:
00000000 <main>:
   0:   00a00513      li   a0,10
   4:   ffdff0ef      jal  ra,0 <main>
   8:   00008067      ret
```

```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

main.s

```
7f 45 4c 46 01 01
01 00 00 00 00 00
00 00 00 00 01 00
f3 00 01 00 00 00
00 00 00 00 ...
```

main.o

Geração de programas nativos

- `objdump`: decodifica arquivos objetos e executáveis e mostra informação de forma amigável (textual)

```
$ riscv64-unknown-elf-objdump -d main.o
```

```
main.o:      file format elf32-littleriscv
```

```
Disassembly of section .text:
```

```
00000000 <main>:  
 0:      00a00513      li   a0,10  
 4:      ffdff0ef      jal  ra,0 <main>  
 8:      00008067      ret
```

```
main:  
  li a0, 10  
  jal func  
  ret
```

main.s

```
7f 45 4c 46 01 01  
01 00 00 00 00 00  
00 00 00 00 01 00  
f3 00 01 00 00 00  
00 00 00 00 ...
```

main.o

Geração de programas nativos

- `objdump`: decodifica arquivos objetos e executáveis e mostra informação de forma amigável (textual)

```
$ riscv64-unknown-elf-objdump -d func.o
```

```
func.o:      file format elf32-littleriscv
```

```
Disassembly of section .text:
```

```
00000000 <func>:  
  0:    02a50513      addi    a0,a0,42  
  4:    00008067      ret
```

```
.globl func  
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

func.s

```
7f 45 4c 46 01 01 01  
00 00 00 00 00 00 00  
00 00 01 00 f3 00 01  
00 00 00 00 00 00 00  
...
```

func.o

Geração de programas nativos

- objdump: decodifica arquivos objetos e executáveis e mostra informação de forma amigável (textual)

```
$ riscv64-unknown-elf-objdump -d main.x
```

```
main.x:      file format elf32-littleriscv
```

```
Disassembly of section .text:
```

```
00010054 <main>:
```

```
   10054:    00a00513      li    a0,10
   10058:    008000ef      jal  ra,10060 <func>
   1005c:    00008067      ret
```

```
00010060 <func>:
```

```
   10060:    02a50513      addi   a0,a0,42
   10064:    00008067      ret
```

```
7f 45 4c 46 01 01
01 00 00 00 00 00
00 00 00 00 02 00
f3 00 01 00 00 00
54 00 01 00 ...
```

main.x

Agenda

- Geração de programas nativos
- **Rótulos e símbolos**
- Referências e relocação
- Símbolos globais vs locais
- Ponto de entrada
- Organização do programa em seções
- Arquivos objetos vs executáveis

Rótulos e símbolos

- Rótulos são marcadores que representam posições no programa, *i.e*, posições de memória;
 - São convertidos para endereços pelo montador e pelo ligador;
- Ex: rótulos `main` e `func`

main.s

```
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

func.s

```
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

Rótulos e símbolos

- Rótulos são marcadores que representam posições no programa, *i.e*, posições de memória;
 - São convertidos para endereços pelo montador e pelo ligador;
- Ex: rótulos `main` e `func`

main.s

```
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

Declaração do rótulo main:

func.s

```
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

Declaração do rótulo func:

Rótulos e símbolos

- Rótulos são marcadores que representam posições no programa, *i.e.*, posições de memória;
 - São convertidos para endereços pelo montador e pelo ligador;
- Ex: rótulos `main` e `func`

main.s

```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

Referência para func

func.s

```
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
```

Rótulos e símbolos

- Rótulos são marcadores de posições no programa,
 - São convertidos para endereços pelo ligador;
- Ex: rótulos `main` e `func`

Montador e ligador convertem rótulos em endereços e ajustam as referências.

main.s

```
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

func.s

```
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

```
00010054 <main>:  
    10054: 00a00513 li    a0,10  
    10058: 008000ef jal   ra,10060 <func>  
    1005c: 00008067 ret
```

```
00010060 <func>:  
    10060: 02a50513 addi  a0,a0,42  
    10064: 00008067 ret
```

riscv64-unknown-elf-objdump -d main.x

Rótulos e símbolos

- Rótulos são geralmente usados para demarcar a posição inicial de variáveis globais e de rotinas do programa.
 - P. ex.: Rotinas `int main();` e `int func(int);`

main.s

```
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

func.s

```
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

```
00010054 <main>:  
    10054: 00a00513 li    a0,10  
    10058: 008000ef jal   ra,10060 <func>  
    1005c: 00008067 ret
```

```
00010060 <func>:  
    10060: 02a50513 addi  a0,a0,42  
    10064: 00008067 ret
```

riscv64-unknown-elf-objdump -d main.x

Rótulos e símbolos

- **Símbolos** são "nomes" que são associados a valores numéricos.
- A **tabela de símbolos** é a estrutura de dados que mapeia os nomes dos símbolos nos valores.
- O montador transforma rótulos em símbolos e os armazena na tabela de símbolos.
 - O símbolo criado é associado a um endereço que representa a posição do rótulo no programa

Rótulos e símbolos

- A tabela de símbolos pode ser visualizada com a ferramenta objdump (opção -t)

```
$ riscv64-unknown-elf-objdump -t main.x

main.x:      file format elf32-littleriscv

SYMBOL TABLE:
00010054 l    d  .text 00000000 .text
...
00010054 l    .text 00000000 main
00011068 g    .text 00000000 __bss_start
00010060 g    .text 00000000 func
00011068 g    .text 00000000 __DATA_BEGIN__
00011068 g    .text 00000000 _edata
00011068 g    .text 00000000 _end
```

Símbolos `main` e `func`. Criados automaticamente pelo montador para os rótulos "main:" e "func:"

Agenda

- Geração de programas nativos
- Rótulos e símbolos
- **Referências e relocação**
- Símbolos globais vs locais
- Ponto de entrada
- Organização do programa em seções
- Arquivos objetos vs executáveis

Referências e relocação

- Instruções ou diretivas de um programa em linguagem de montagem podem referenciar símbolos pelo nome
 - O montador e o ligador substituem as referências pelo valor do símbolo
- Exemplo:

```
main.s  
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret  
  
func.s  
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

Referência para o símbolo `func`.

Referências e relocação

- Instruções ou diretivas de um programa em linguagem de montagem podem referenciar símbolos pelo nome
 - O montador e o ligador substituem as referências pelo valor do símbolo
- Exemplo:

main.s

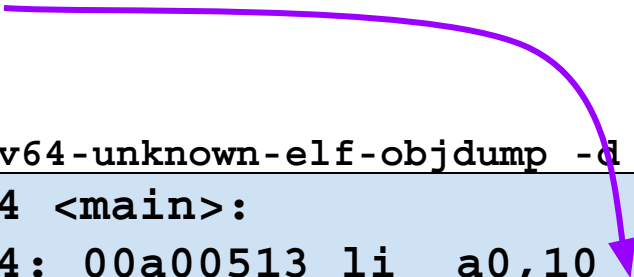
```
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

func.s

```
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

riscv64-unknown-elf-objdump -d main.x

```
00010054 <main>:  
    10054: 00a00513 li    a0,10  
    10058: 008000ef jal   ra,10060 <func>  
    1005c: 00008067 ret  
  
00010060 <func>:  
    10060: 02a50513 addi  a0,a0,42  
    10064: 00008067 ret
```



Referências e relocação

O montador e o ligador substituem as referências pelo valor do símbolo. Como?

Referências e relocação

O montador e o ligador substituem as referências pelo valor do símbolo. Como?

- **A tabela de relocação** contém informações sobre itens do programa (instruções e dados) que referenciam símbolos e necessitam ajustes quando os valores dos símbolos mudam.
- Para cada referência, o montador adiciona uma entrada na tabela de relocação e, ao final, grava a tabela de relocação no arquivo objeto.
- O ligador usa a tabela de relocação para ajustar as referências!

Referências e relocação

Relocação é o processo de re-associar endereços às instruções e dados do programa.

O ligador realiza a relocação quando está agrupando (ligando) múltiplos arquivos objeto.

Como consequência da relocação, as referências para símbolos que estão associados a endereços devem ser ajustadas!

tabela de relocação no arquivo objeto.

- O ligador usa a tabela de relocação para ajustar as referências!

Referências e relocação

Podemos inspecionar a tabela de relocação com a ferramenta objdump (opção -r). Exemplo:

```
main.s  
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

```
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o  
$ riscv64-unknown-elf-objdump -r main.o
```

```
main.o:      file format elf32-littleriscv
```

```
RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
```

OFFSET	TYPE	VALUE
00000004	R_RISCV_JAL	func

Referências e relocação

Referências não definidas são referências para símbolos que não foram definidos.

- Exemplo: referência para o símbolo `func` em "main.s"

main.s

```
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
```

```
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-objdump -t main.o
```

```
main.o:      file format elf32-littleriscv
```

```
SYMBOL TABLE:
```

```
00000000 1      d  .text  00000000 .text
00000000 1      d  .data  00000000 .data
00000000 1      d  .bss   00000000 .bss
00000000 1          .text  00000000 main
...
00000000          *UND*  00000000 func
```

Referências e relocação

Referências não definidas são referências para símbolos que não foram definidos.

- O ligador tenta resolver referências não definidas olhando para símbolos em outros arquivos objetos.
- Exemplo: procura pelo símbolo `func` no arquivo "func.o" durante a ligação.
 - Se não encontrar o símbolo, o ligador interrompe o processo de ligação e emite um erro.

```
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 000000000010054
riscv64-unknown-elf-ld: main.o: in function `main':
(.text+0x4): undefined reference to `func'
```

Referências e relocação

Referências não definidas são referências para

Neste caso, o erro aconteceu porque tentamos realizar a ligação do arquivo "main.o" sem o arquivo "func.o", que contém o símbolo `func`.

func.o durante a ligação.

- Se não encontrar o símbolo, o linker falha no processo de ligação e emite um erro.

```
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 000000000010054
riscv64-unknown-elf-ld: main.o: in function `main':
(.text+0x4): undefined reference to `func'
```

Referências e relocação

Referências não definidas são referências para símbolos que não foram definidos.

- O ligador tenta resolver referências não definidas olhando para símbolos em outros arquivos objetos.
- Exemplo: procura pelo símbolo `func` no arquivo "func.o" durante a ligação.

```
main.s  
main:  
    li a0, 10  
    jal func  
    ret
```

```
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o  
$ riscv64-unknown-elf-objdump -t main.o  
  
main.o:      file format elf32-littleriscv  
  
SYMBOL TABLE:  
00000000 1      d  .text  00000000  .text  
00000000 1      d  .data  00000000  .data  
00000000 1      d   bss  00000000  bss
```

Agenda

- Geração de programas nativos
- Rótulos e símbolos
- Referências e relocação
- **Símbolos globais vs locais**
- Ponto de entrada
- Organização do programa em seções
- Arquivos objetos vs executáveis

Símbolos globais vs locais

Os símbolos do programa são classificados como **globais** ou **locais**.

- Locais: apenas visíveis dentro do mesmo arquivo.
- Globais: visíveis externamente => Usados pelo ligador para resolver referências não definidas.

Por padrão os símbolos são locais.

- A diretiva `".global nome"` transforma o símbolo `nome` em global.

```
func.s  
    .global func  
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

Símbolos globais vs locais

Os símbolos do programa são classificados como

Se o símbolo `func` (no arquivo "func.s") não for declarado como global, o ligador não conseguirá resolver a referência a este símbolo no arquivo "main.s".

Por padrão os símbolos são locais.

- A diretiva `".global nome"` transforma o símbolo `nome` em global.

```
func.s  
.global func  
func:  
    addi a0, a0, 42  
    ret
```

Símbolos globais vs locais

Exemplo: Arquivo "func.s" sem a diretiva `.globl`

```
$ cat main.s
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 0000000000010054
riscv64-unknown-elf-ld: main.o: in function `main':
(.text+0x4): undefined reference to `func'
```

Símbolos globais vs locais

Exemplo: Arquivo "func.s" com a diretiva `.globl`

```
$ cat main.s
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
.globl func
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 0000000000010054
```

Agenda

- Geração de programas nativos
- Rótulos e símbolos
- Referências e relocação
- Símbolos globais vs locais
- **Ponto de entrada**
- Organização do programa em seções
- Arquivos objetos vs executáveis

Ponto de entrada do programa

O ponto de entrada é o endereço da primeira instrução que deve ser executada quando um programa é iniciado.

- Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho do arquivo executável
- Para executar uma aplicação, o sistema operacional carrega o código e os dados da aplicação na memória principal e executa uma instrução de salto para o ponto de entrada do programa.

Ponto de entrada do programa

Podemos inspecionar o cabeçalho de um arquivo executável ELF com a ferramenta readelf.

- Exemplo:

```
$ riscv64-unknown-elf-readelf -h main.x
ELF Header:
  Magic:      7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00
  Class:                               ELF32
  Data:                               2's complement, little endian
  Version:                               1 (current)
  OS/ABI:                               UNIX - System V
  ABI Version:                           0
  Type:                               EXEC (Executable file)
  Machine:                               RISC-V
  Version:                               0x1
  Entry point address:                   0x10054
  Start of program headers:              52 (bytes into file)
  Start of section headers:              516 (bytes into file)
  ...
```

Ponto de entrada do programa

Podemos inspecionar o cabeçalho de um arquivo executável ELF com a ferramenta readelf.

- Exemplo:

```
$ riscv64-unknown-elf-readelf -h main.x
ELF Header:
  Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 00 00 00
  Class:                   ELF32
  Data:                     2's
  Version:                  1 (c
  OS/ABI:                   UNIX
  ABI Version:              0
  Type:                     EXEC (F
  Machine:                  RISC-V
  Version:                  0x1
  Entry point address:      0x10054
  Start of program headers: 52 (bytes into file)
  Start of section headers: 516 (bytes into file)
  ...
```

Endereço do
ponto de entrada

Ponto de entrada do programa

Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho do arquivo executável!

Como o ligador sabe qual é o ponto de entrada?

- Ele procura pelo símbolo `_start`, se não encontrar, então ele ajusta o ponto de entrada como sendo o endereço da primeira instrução que ele colocou no programa executável.

Ponto de entrada do programa

Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho de arquivo executável!

Warning: o ligador não encontrou o símbolo `_start` neste programa. Escolheu o endereço `0x10054` como ponto de entrada.

```
$ cat main.s
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
.globl func
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -melf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 0000000000010054
```

Ponto de entrada do programa

Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho do arquivo executável!

```
$ cat main.s
main:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
.globl func
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 0000000000010054
```

E se trocarmos o rótulo
main por `_start`?

Ponto de entrada do programa

Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho do arquivo executável!

```
$ cat main.s
_start:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
.globl func
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32imac main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32imac func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
riscv64-unknown-elf-ld: warning: cannot find entry symbol _start;
defaulting to 0000000000010054
```

Continua não encontrando porque `_start` tem que ser um símbolo global!

Ponto de entrada do programa

Este endereço é gravado pelo ligador em um campo no cabeçalho do arquivo executável!

Devemos declarar o símbolo `_start` como global!

```
$ cat main.s
.globl _start
_start:
    li a0, 10
    jal func
    ret
$ cat func.s
.globl func
func:
    addi a0, a0, 42
    ret
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im main.s -o main.o
$ riscv64-unknown-elf-as -march=rv32im func.s -o func.o
$ riscv64-unknown-elf-ld -m elf32lriscv main.o func.o -o main.x
```

Agenda

- Geração de programas nativos
- Rótulos e símbolos
- Referências e relocação
- Símbolos globais vs locais
- Ponto de entrada
- **Organização do programa em seções**
- Arquivos objetos vs executáveis

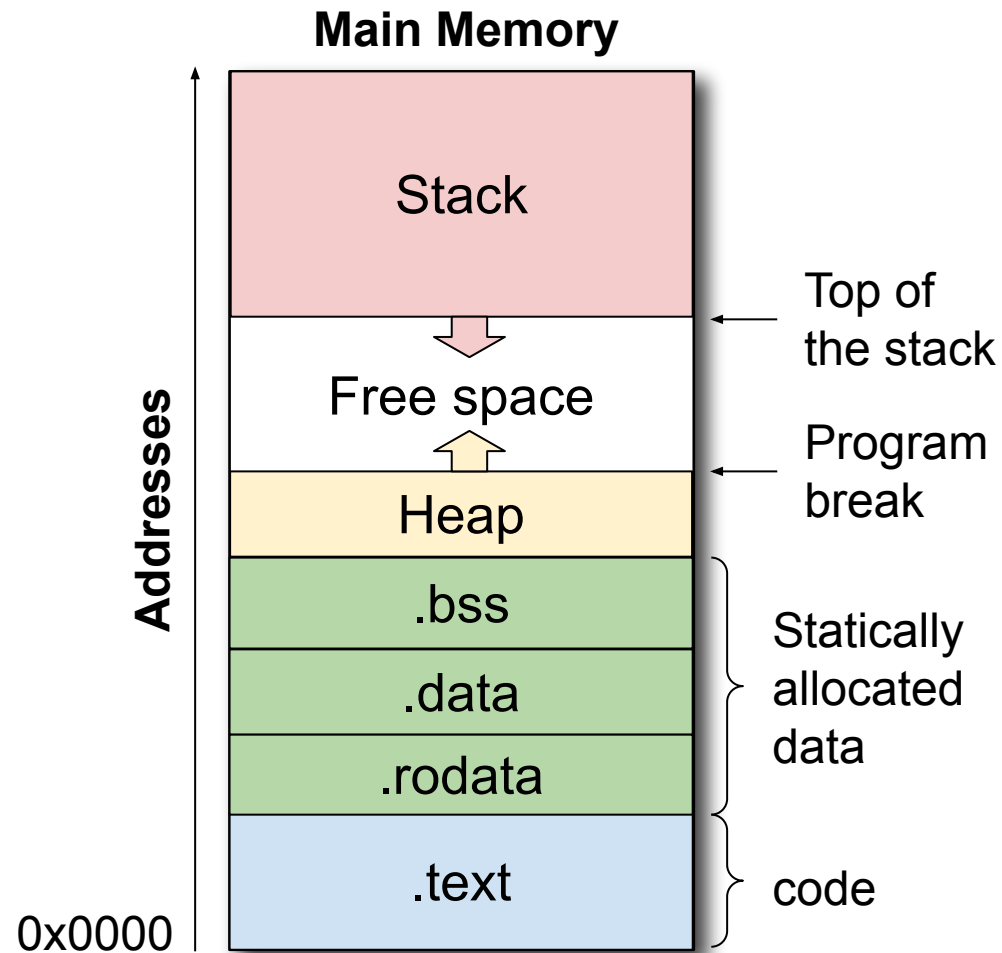
Organização do programa em seções

Programas executáveis são organizados em seções.

- Seção `".text"`: dedicada ao armazenamento do código do programa (as instruções)
- Seção `".data"`: dedicada ao armazenamento das variáveis globais inicializadas
- Seção `".bss"`: dedicada ao armazenamento das variáveis globais não inicializadas
- Seção `".rodata"`: dedicada ao armazenamento de constantes (*ready-only*).

Organização do programa em seções

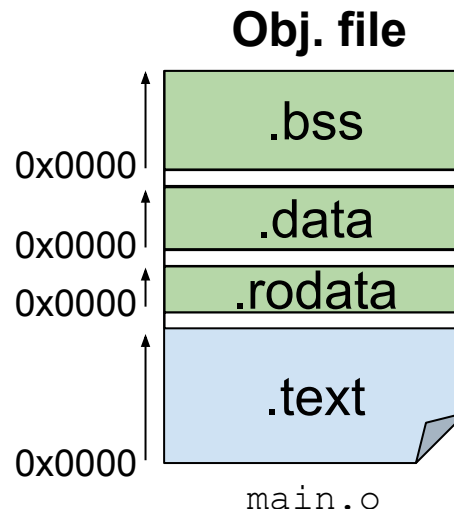
Programas executáveis são organizados em seções.



Organização do programa em seções

Arquivos objeto também são organizados em seções.

- O montador produz um **arquivo objeto** com uma ou mais seções.
- Cada seção tem seu próprio espaço de endereçamento e se inicia no endereço 0.

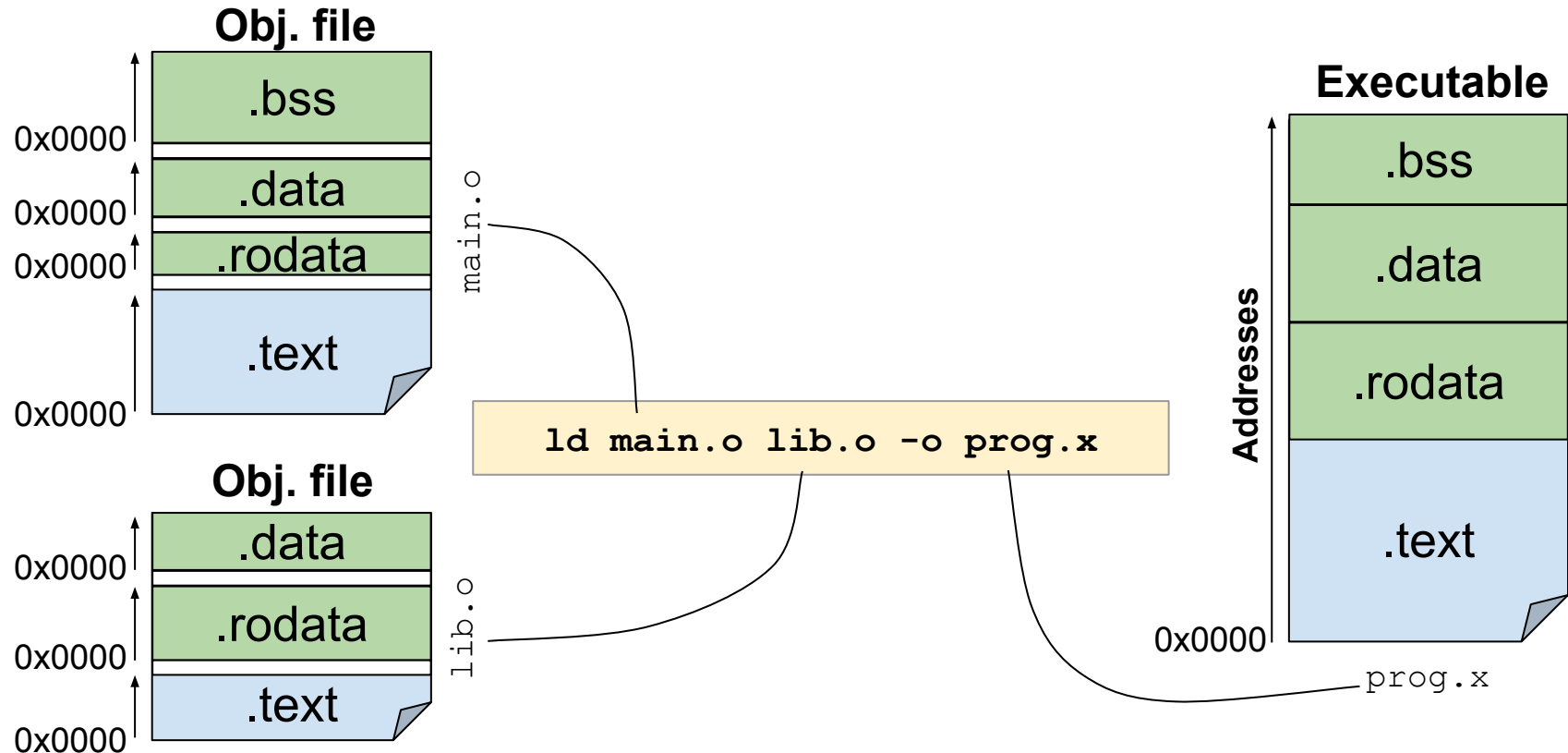


Organização do programa em seções

- **arquivo objeto** é dividido em partes e possui:
 - **Um cabeçalho:** que indica o tamanho e a posição das partes restantes do arquivo;
 - **Conjunto de seções.** Por exemplo:
 - **Seção .text:** contém o código em ling. de máquina.
 - **Seção .data:** contém variáveis globais inicializadas.
 - **Informações de depuração:** que mapeia instruções para linhas no prog. fonte.
 - **Tabela de símbolos:** lista de símbolos definidos e não resolvidos do arquivo.
 - **Tabela de relocação:** lista de referências para símbolos.

Organização do programa em seções

O ligador a) agrupa as seções, b) ajusta (reloca) as referências a símbolos (p.ex: campos de instruções que referenciam símbolos) e c) liga os símbolos exportados e não definidos.



Diretiva `.section`

A diretiva "`.section sec`" instrui o montador a mudar para a seção `sec`.

- A partir deste ponto, o conteúdo montado (instruções e dados) é colocado na seção `sec`

Exemplo:

1) Muda para seção `.data`

```
.section .data  
x: .word 10
```

2) Cria um rótulo e adiciona a constante de 32 *bits* com o valor 10 na seção `.data`

3) Muda para seção `.text`

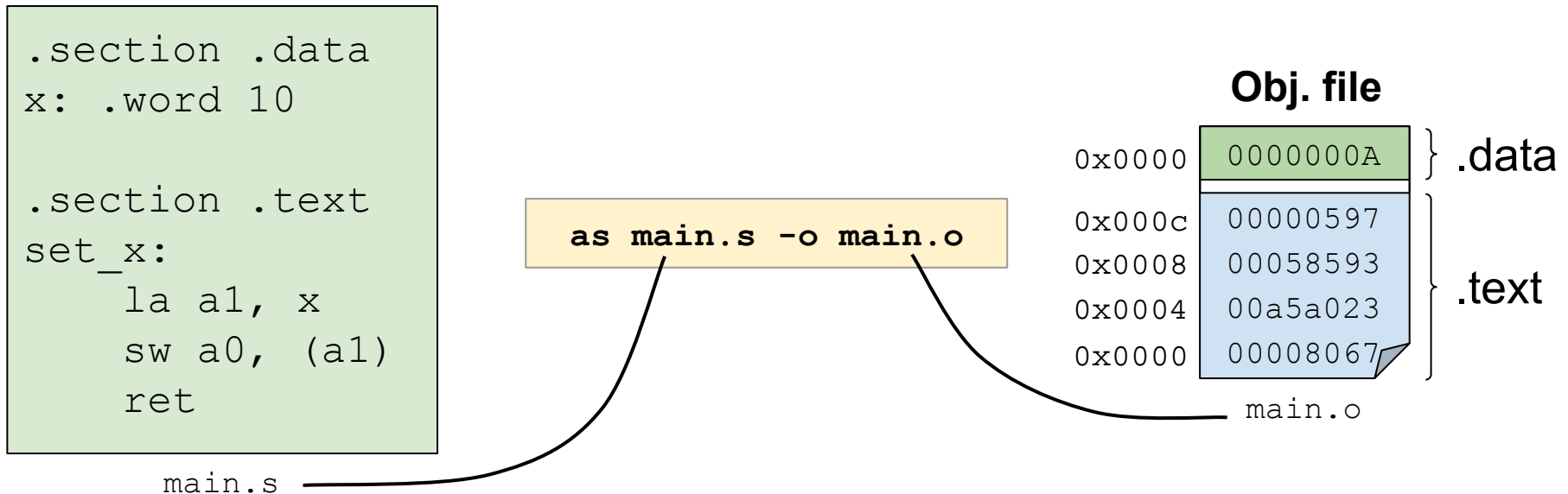
```
.section .text  
set_x:  
    la a1, x  
    sw a0, (a1)  
    ret
```

4) Cria um rótulo e adiciona instruções na seção `.text`

Diretiva `.section`

O arquivo objeto produzido pelo montador contém as seções definidas pela diretiva `.section`.

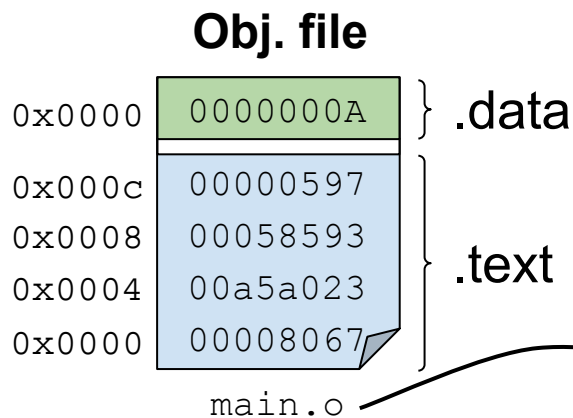
- Cada seção tem seu próprio espaço de endereçamento e se inicia no endereço 0.



Diretiva `.section`

O desmontador (`objdump`) pode ser usado para inspecionar o conteúdo das seções do arquivo objeto produzido pelo montador.

Exemplo:



```
objdump -D main.o
```

Disassembly of section `.text`:

```
00000000 <set_x>:  
0: 00000597  auipc a1,0x0  
4: 00058593  mv a1,a1  
8: 00a5a023  sw a0,0(a1) # 0 <set_x>  
c: 00008067  ret
```

Disassembly of section `.data`:

```
00000000 <x>:  
0: 000a  
...
```

Agenda

- Geração de programas nativos
- Rótulos e símbolos
- Referências e relocação
- Símbolos globais vs locais
- Ponto de entrada
- Organização do programa em seções
- **Arquivos objetos vs executáveis**

Arquivos objetos vs executáveis

Sistemas Linux geralmente usam o formato ELF para armazenar tanto arquivos objeto quanto arquivos executáveis. No entanto:

- Arquivos objeto não possuem ponto de entrada.

Arquivos objetos vs executáveis

Sistemas Linux geralmente usam o formato ELF para armazenar tanto arquivos objeto quanto arquivos executáveis. No entanto:

- Arquivos objeto não possuem ponto de entrada.
- Endereços de código e variáveis em arquivos objeto são geralmente modificados pelo ligador. Ou seja, estes endereços não representam os endereços das variáveis e funções quando o programa estiver rodando.

Arquivos objetos vs executáveis

Sistemas Linux geralmente usam o formato ELF para armazenar tanto arquivos objeto quanto arquivos executáveis. No entanto:

- Arquivos objeto podem ter múltiplas referências para símbolos não definidos.
 - Espera-se que o ligador resolva estas referências durante o processo de ligação.
- O ligador geralmente não produz arquivos executáveis com referências não definidas.