Programação Estruturada

Ponteiros — Parte 2

Professores Emílio Francesquini e Carla Negri Lintzmayer

2018.Q3

Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC

UFABC

Ponteiros

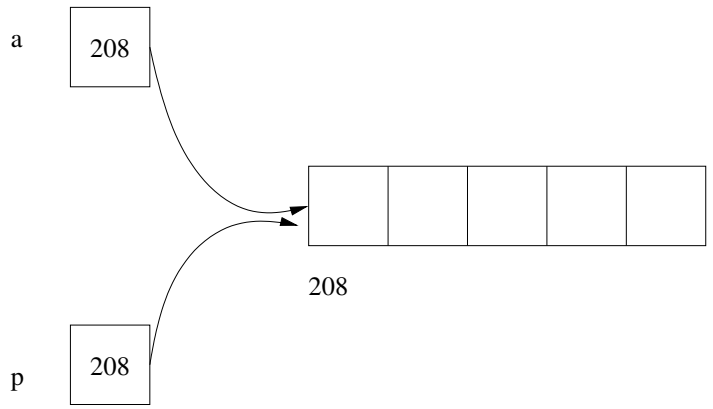
Ponteiros

Lembre-se que uma variável vetor possui um endereço, e que podemos atribuí-la para uma variável ponteiro:

```
1  int a[] = {1, 2, 3, 4, 5};
2  int *p;
3  p = a;
```

E podemos então usar `p` como se fosse um vetor:

```
1  for (i = 0; i < 5; i++)
2      p[i] = i*i;
```



Ponteiros

- Em aulas anteriores, ao trabalhar com vetores e matrizes, assumíamos que estes tinham dimensões máximas.

```
1  #define MAX 100
2  .
3  .
4  .
5  int vet[MAX];
6  int m[MAX][MAX];
```

- O que acontece se o usuário precisar trabalhar com vetores ou matrizes maiores?
- Temos que mudar o valor de `MAX` e recompilar o programa?

Ponteiros e alocação dinâmica

- Alocação dinâmica refere-se à possibilidade de alocar mais memória durante a execução de um programa conforme haja necessidade.
- Pode-se alocar dinamicamente uma quantidade de memória contígua e associá-la com um ponteiro, por exemplo.
- Este ponteiro então será usado como um vetor.
- Desta forma, podemos criar programas sem saber a priori o número de dados a ser armazenado.

Ponteiros e alocação dinâmica

Na biblioteca `stdlib.h` do C existem duas funções para se fazer alocação dinâmica de memória: `malloc` e `calloc`.

Função **malloc**: O seu único parâmetro é o número de bytes que deve ser alocado.

Ela devolve o **endereço de memória** do início da região que foi alocada ou **NULL** caso aconteça algum erro.

Exemplo de alocação dinâmica de um espaço para armazenar 100 inteiros:

```
1  int *p, i;
2  p = malloc(100 * sizeof(int));
3  for (i = 0; i < 100; i++)
4      p[i] = 2*i;
```

Ponteiros e alocação dinâmica

Função **calloc**: Seus parâmetros são o número de "blocos de memória" a serem alocados e o tamanho em bytes de cada bloco.

Ela devolve o **endereço de memória** do início da região que foi alocada ou **NULL** caso aconteça algum erro.

Exemplo de alocação dinâmica de espaço para armazenar 100 inteiros:

```
1  int *p, i;
2  p = calloc(100, sizeof(int));
3  for (i = 0; i < 100; i++)
4      p[i] = 2*i;
```

Diferença entre malloc e calloc

A função **calloc** *"zera"* todos os bits da memória alocada enquanto que a **malloc** não.

Logo, se não for necessária uma inicialização (com zeros) da memória alocada, o **malloc** é preferível por ser um pouco mais rápido.

Ponteiros e alocação dinâmica

Juntamente com estas funções, está definida a função `free` na biblioteca `stdlib.h`.

Ela recebe como parâmetro um ponteiro, e libera a memória previamente alocada e apontada pelo ponteiro.

Exemplo:

```
1 int *p;
2 p = calloc(100, sizeof(int));
3 ....
4 free(p);
```

REGRA para uso correto de alocação dinâmica: toda memória alocada durante a execução de um programa e que não for mais utilizada **deve ser desalocada com o free!**

Exemplos de alocação dinâmica de vetores

Exemplo 1: produto escalar de 2 vetores

Problema

Calcular o produto escalar de 2 vetores.

Exemplo 1

O programa lê inicialmente a dimensão dos vetores e em seguida faz a alocação dos mesmos.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    double *v1, *v2, prodEsc;
    int n, i;

    scanf("%d", &n);
    v1 = malloc(n*sizeof(double));
    v2 = malloc(n*sizeof(double));
    ...
}
```

Exemplo 1

Em seguida o programa faz a leitura dos dados dos dois vetores.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main() {
5      ...
6      for (i = 0; i < n; i++)
7          scanf("%lf", &v1[i]);
8      for (i = 0; i < n; i++)
9          scanf("%lf", &v2[i]);
10     ...
11  }
```

Exemplo 1

Finalmente, o programa calcula o produto e imprime o resultado.
Note que, no final, os dois vetores têm suas memórias liberadas.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    ...
    prodEsc = 0;
    for (i = 0; i < n; i++)
        prodEsc = prodEsc + (v1[i] * v2[i]);

    printf("Resposta: %.2lf\n", prodEsc);

    free(v1);
    free(v2);
    return 0;
```

Exemplo 1

Solução completa:

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    double *v1, *v2, prodEsc;
    int n, i;

    scanf("%d", &n);
    v1 = malloc(n * sizeof(double));
    v2 = malloc(n * sizeof(double));

    for (i = 0; i < n; i++)
        scanf("%lf", &v1[i]);
    for (i = 0; i < n; i++)
        scanf("%lf", &v2[i]);

    prodEsc = 0;
    for (i = 0; i < n; i++)
        prodEsc = prodEsc + (v1[i] * v2[i]);

    printf("Resposta: %.2lf\n", prodEsc);

    free(v1);
    free(v2);
    return 0;
}
```

Exemplo 1

Problema

Criar uma função que recebe duas strings de tamanhos quaisquer e que devolve a concatenação delas.

Lembre-se que uma função não pode devolver um vetor (uma string é um vetor de caracteres), mas ela pode devolver um ponteiro.

Assim, o protótipo da função será:

```
1 char *concatena(char *s1, char *s2);
```

Exemplo 2

Primeiramente devemos alocar a string resposta **sres** com tamanho suficiente para armazenar a concatenação de **s1** com s2.

```
1  char *concatena(char *s1, char *s2) {
2      char *sres = NULL;
3      int t1, t2, i;
4
5      t1 = strlen(s1);
6      t2 = strlen(s2);
7
8      sres = malloc((t1+t2+1) * sizeof(char));
9      ...
10 }
```

Exemplo 2

Depois fazemos a cópia de `s1` e `s2` para `sres` e devolvemos o valor do ponteiro `sres`.

```
1  char *concatena(char *s1, char *s2) {
2      char *sres = NULL;
3      int t1, t2, i;
4      t1 = strlen(s1);
5      t2 = strlen(s2);
6      sres = malloc((t1+t2+1) * sizeof(char));
7
8      for (i = 0; i < t1; i++)
9          sres[i] = s1[i];
10     for (i = 0; i < t2; i++)
11         sres[i + t1] = s2[i];
12
13     sres[t1 + t2] = '\0';
14
15     return sres;
16 }
```

Exemplo 2

Considere esta versão onde fazemos a liberação de memória alocada. Ela está correta?

```c
char *concatena(char *s1, char *s2) {
    char *sres = NULL;
    int t1, t2, i;
    t1 = strlen(s1);
    t2 = strlen(s2);
    sres = malloc((t1+t2+1) * sizeof(char));

    for (i = 0; i < t1; i++)
        sres[i] = s1[i];
    for (i = 0; i < t2; i++)
        sres[i + t1] = s2[i];
    sres[t1+t2]='\0';

    free(sres); /* Libera memória */
    return sres;
}
```

Exemplo 2

Exemplo de implementação e uso correto da função.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

char *concatena(char *s1, char *s2); /* já implementamos */

int main() {
    char s1[100], s2[100], *s3;

    fgets(s1, 100, stdin);
    if (s1[strlen(s1)-1] == '\n')
        s1[strlen(s1)-1] = '\0'; /* Remove '\n' */

    fgets(s2, 100, stdin);
    if (s2[strlen(s2)-1] == '\n')
        s2[strlen(s2)-1] = '\0';

    s3 = concatena(s1, s2);
    printf("%s\n", s3);

    free(s3); /* aqui podemos liberar a memória */
    return 0;
}
```

Erros comuns ao usar alocação dinâmica

Erros comuns ao usar alocação dinâmica

- Você pode fazer ponteiros distintos apontarem para uma mesma região de memória.
  - Mas tome cuidado para não utilizar um ponteiro se a sua região de memória foi desalocada!

```
1  double *v1, *v2;
2
3  v1 = malloc(100 * sizeof(double));
4  v2 = v1;
5  free(v1);
6
7  for (i = 0; i < n; i++)
8      v2[i] = i*i;
```

- O código acima está errado e pode causar erros durante a execução, já que `v2` está acessando posições de memória que foram liberadas!

Erros comuns ao usar alocação dinâmica

O programa abaixo imprime resultados diferentes dependendo se comentamos ou não o comando `free(v1)`. Por quê?

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    double *v1, *v2, *v3;
    int i;
    v1 = malloc(100 * sizeof(double));
    v2 = v1;

    for (i = 0; i < 100; i++)
        v2[i] = i;
    free(v1); /* Comente e descomente este comando */

    v3 = calloc(100, sizeof(double));
    for (i = 0; i < 100; i++)
        printf("%.2lf\n", v2[i]);
    free(v3);
    return 0;
}
```

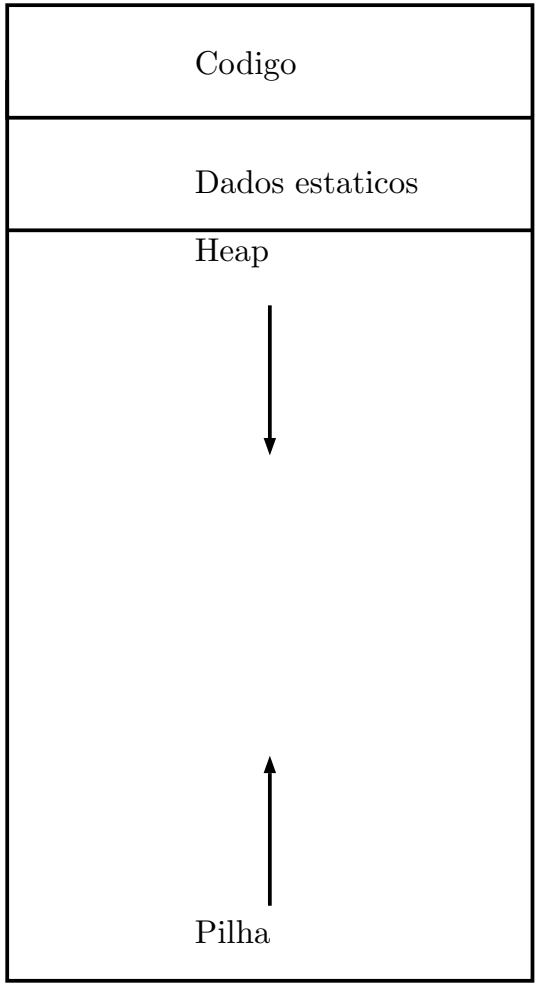
Organização da memória do computador

Organização da memória do computador

A memória do computador na execução de um programa é organizada em quatro segmentos:

- **Código executável**: Contém o código binário do programa.
- **Dados estáticos**: Contém variáveis globais e estáticas que existem durante toda a execução do programa.
- **Pilha**: Contém as variáveis locais que são criadas na execução de uma função e depois são removidas da pilha ao término da função.
- **Heap**: Contém as variáveis criadas por alocação dinâmica.

Organização da memória do computador



Organização da memória do computador

Em C99 podemos declarar vetores de tamanho variável em tempo de execução usando o valor de uma variável.

No exemplo abaixo declaramos o vetor **v** com tamanho igual ao valor da variável **n**, que foi lida do teclado.

```c
#include <stdio.h>
int main() {
    long int n, i;

    scanf("%ld", &n);
    double v[n]; /* Vetor alocado com tamanho n não
    ↪  pré-estabelecido */

    for (i = 0; i < n; i++)
        v[i] = i;
    for (i = 0; i < n; i++)
        printf("%.2lf\n", v[i]);
    return 0;
}
```

Organização da memória do computador

Porém, a criação de vetores desta forma faz a alocação de memória na **pilha**, que possui um limite máximo.

Execute o programa a seguir digitando 1000000 e depois 2000000.

```c
#include <stdio.h>
int main() {
    long int n, i;

    scanf("%ld", &n);
    double v[n]; /* Vetor alocado com tamanho n não
    ↪  pré-estabelecido */

    for (i = 0; i < n; i++)
        v[i] = i;
    for (i = 0; i < n; i++)
        printf("%.2lf\n", v[i]);
    return 0;
}
```

Organização da memória do computador

- O programa anterior será encerrado (*segmentation fault*) se for usado um valor grande o suficiente para n.
- Isto se deve ao fato de que o SO limita o que pode ser alocado na pilha na execução de uma função.
- Este limite não existe para o Heap (com exceção do limite de memória do computador).

Organização da memória do computador

Utilizando alocação dinâmica não temos o problema de erro do programa anterior.

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main() {
    long int n = 2000000, i;
    double *v = malloc(n * sizeof(double));
    for (i = 0; i < n; i++)
        v[i] = i;
    for (i = 0; i < n; i++)
        printf("%.2lf\n", v[i]);
    free(v);
    return 0;
}
```

Exemplos de ponteiros e alocação dinâmica

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

Vamos criar uma aplicação que usa vetores dinâmicos e implementa as seguintes operações:

- Inclusão de um elemento no final do vetor.
- Exclusão da primeira ocorrência de um elemento no vetor.
- Impressão do vetor.

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

- O tamanho do vetor deve se ajustar automaticamente: se elementos são inseridos, devemos "aumentar" o tamanho do vetor para inclusão de novos elementos, e se elementos forem removidos devemos "diminuir" o tamanho vetor.
- Temos duas variáveis associadas ao vetor:
  - `tam`: denota quantos elementos estão armazenados no vetor.
  - `max_tam`: denota o tamanho alocado do vetor.

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

Temos as seguintes regras para ajuste do tamanho alocado do vetor:

- O vetor deve ter tamanho alocado de pelo menos 4.
- Se o vetor ficar cheio, então devemos alocar um novo vetor com o dobro do tamanho atual.
- Se o número de elementos armazenados no vetor for menor do que 1/4 do tamanho alocado do vetor, então devemos alocar um novo vetor com metade do tamanho atual.

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

Implementaremos as seguintes funções:

```c
int *cria_vet(int *tam, int *max_tam);
```

Aloca um vetor inicial de tamanho 4, inicializando `tam` com valor 0, `max_tam` com valor 4, e devolvendo o endereço do vetor alocado.

```c
void imprime_vet(int *v, int tam, int max_tam);
```

Imprime o conteúdo e tamanhos associados ao vetor `v`.

```c
int *adiciona(int *v, int *tam, int *max_tam, int
↪  elem);
```

Adiciona o elemento `elem` no final do vetor `v`. Caso não haja espaço, um novo vetor com o dobro do tamanho deve ser alocado. A função sempre retorna o endereço do vetor, sendo o novo alocado ou o atual. Além disso, os valores de `tam` e `max_tam` devem ser

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

Implementaremos as seguintes funções:

```c
int busca(int *v, int tam, int elem);
```

Determina se o elemento `elem` está presente ou não no vetor `v`. Caso esteja presente, retorna a posição da primeira ocorrência de `elem` em `v`. Caso contrário, retorna -1.

```c
int *remove(int *v, int *tam, int *max_tam, int
↪  elem);
```

Remove a primeira ocorrência do elemento `elem` do vetor `v`, caso este esteja presente. O valor de `tam` deve ser decrementado de 1. Caso o número de elementos armazenados seja menor do que $\frac{1}{4}$`max_tam`, então um novo vetor de tamanho $\frac{1}{2}$`max_tam` deve ser alocado no lugar de `v`. A função sempre retorna o endereço inicial do vetor, sendo um novo vetor alocado ou não.

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

```c
/* Cria vetor com tamanho total 4. Devolve o endereço do vetor criado. */
int *cria_vet(int *tam, int *max_tam) {
    int *v = malloc(4 * sizeof(int));
    *tam = 0;
    *max_tam = 4;
    return v;
}

/* Imprime o vetor. */
void imprime_vet(int *v, int tam, int max_tam) {
    int i;
    printf("Vetor de tamanho %d (max. alocado %d):\n", tam, max_tam);
    printf("%d", v[0]);
    for (i = 1; i < tam; i++)
        printf(", %d", v[i]);
    printf("\n");
}
```

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

```
1  int *adiciona(int *v, int *tam, int *max_tam, int elem) {
2      if (*tam < *max_tam) {
3          /* Tem espaço para o novo elemento. */
4          v[*tam] = e;
5          (*tam)++;
6          return v;
7      } else {
8          /* Precisamos alocar um espaço maior. */
9          ...
10     }
11 }
```

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

```c
int *adiciona(int *v, int *tam, int *max_tam, int elem) {
    if (*tam < *max_tam) {
        /* Tem espaco para o novo elemento. */
        ...
    } else {
        /* Precisamos alocar um espaço maior. */
        int *vaux = malloc(2 * (*max_tam) * (sizeof(int)));
        int i;
        for (i = 0; i < *tam; i++) /* Salva dados de v em vaux.
        ↪  */
            vaux[i] = v[i];
        vaux[*tam] = e; /* Adiciona elemento no fim. */
        (*tam)++;
        *max_tam = 2 * (*max_tam); /* Atualiza dados de tamanho.
        ↪  */

        free(v); /* Libera memória não mais necessária. */
        return vaux;
    }
}
```

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

```c
/* Retorna posição da primeira ocorrência de elem ou -1 caso
   elem não seja encontrado. */
int busca(int *v, int tam, int elem) {
    int i;
    for (i = 0; i < tam; i++)
        if (v[i] == elem)
            return i;
    return -1;
}
```

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

```
1  int *remove(int *v, int *tam, int *max_tam, int elem) {
2      int i;
3      i = busca(v, *tam, elem);
4      if (i != -1) {
5          /* O elemento está em v. */
6          /* Copia dados a partir da posição i+1 uma posição para
           ↪  trás. */
7          for (; i < (*tam)-1; i++)
8              v[i] = v[i+1];
9          (*tam)--;
10
11         /* Se tamanho do vetor for > 4 e ele estiver menos de
           ↪  1/4 ocupado devemos diminuir tamanho do vetor pela
           ↪  metade. */
12         if (*tam < (0.25 * (*max_tam)) && *max_tam > 4) {
13             ...
14             /* Exercício. */
15         }
16     }
17     return v;
18 }
```

Exemplo de ponteiros e alocação dinâmica

Com essas funções podemos executar o seguinte exemplo:

```c
int main() {
    int *vet, tam, max_tam, i;
    vet = cria_vet(&tam, &max_tam);

    for (i = 0; i < 20; i++)
        vet = adiciona(vet, &tam, &max_tam, i);
    imprime_vet(vet, tam, max_tam);

    vet = remove(vet, &tam, &max_tam, 14);
    imprime_vet(vet, tam, max_tam);
    for (i = 5; i < 15; i++)
        vet = remove(vet, &tam, &max_tam, i);
    imprime_vet(vet, tam, max_tam);

    for (i = 0; i < 20; i++)
        vet = adiciona(vet, &tam, &max_tam, i);
    imprime_vet(vet, tam, max_tam);

    free(vet);
    return 0;
```

Informações extras: ponteiros para ponteiros e alocação dinâmica de matrizes

Informações extras: alocação dinâmica de matrizes

- Em aplicações científicas e de engenharias, é muito comum a realização de diversas operações sobre matrizes.
- Em situações reais o ideal é alocar memória suficiente para conter os dados a serem tratados. Não usar nem mais e nem menos!
- Como alocar vetores multidimensionais dinamicamente?

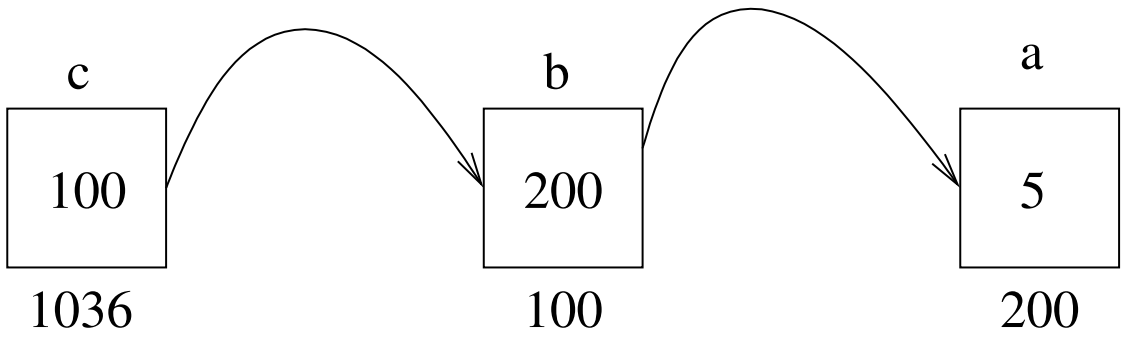
Informações extras: ponteiros para ponteiros

- Uma variável ponteiro está alocada na memória do computador como qualquer outra variável.
- Portanto, podemos criar um ponteiro que contém o endereço de memória de um outro ponteiro.
- Para criar um ponteiro para ponteiro: `tipo **nomePonteiro;`

```c
int main() {
    int a = 5, *b, **c;
    b = &a;
    c = &b;
    printf("%d\n", a);
    printf("%d\n", *b);
    printf("%d\n", *(*c));
    return 0;
}
```

Informações extras: ponteiros para ponteiros

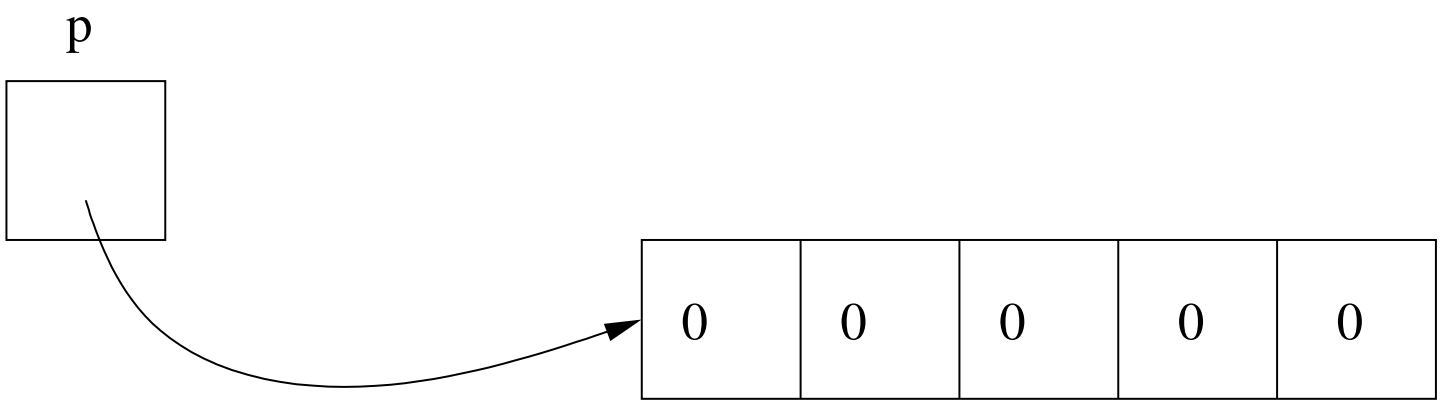
O programa imprime 5 três vezes, mostrando as três formas de acesso à variável `a`: `a`, `*b`, `**c`.



Informações extras: ponteiros para ponteiros

Pela nossa discussão anterior sobre ponteiros, sabemos que um ponteiro pode ser usado para referenciar um vetor alocado dinamicamente.

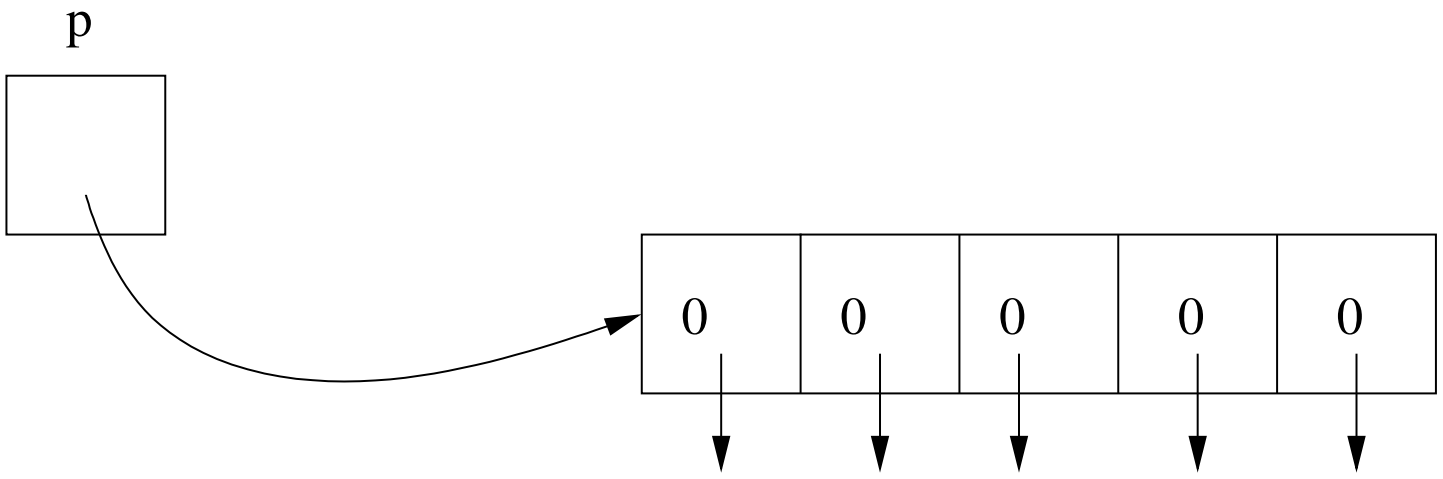
```
1 int *p;
2 p = calloc(5, sizeof(int));
```



Informações extras: ponteiros para ponteiros

A mesma coisa acontece com um ponteiro para ponteiro, só que neste caso o vetor alocado é de ponteiros.

```
1 int **p;
2 p = calloc(5, sizeof(int *));
```

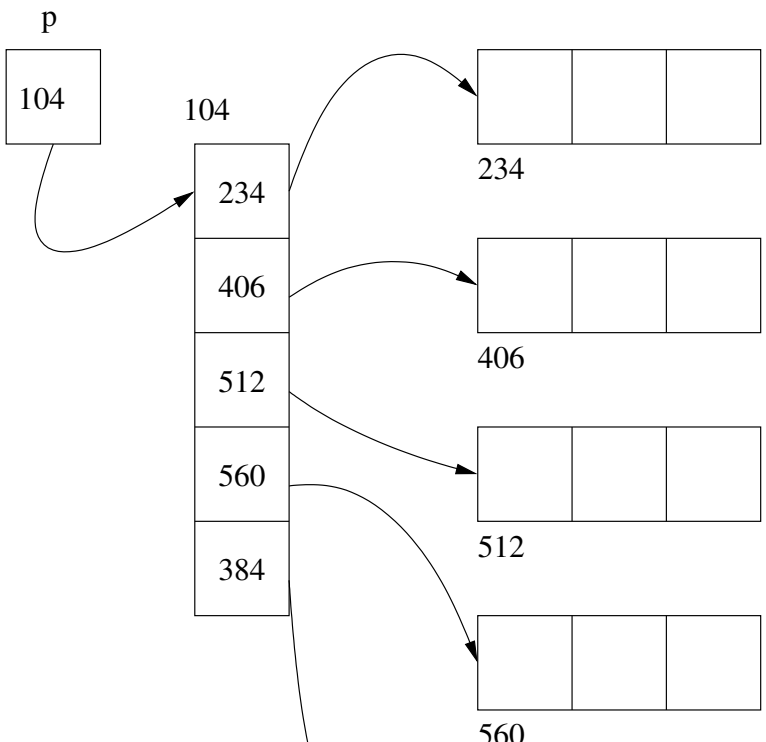


Note que cada posição do vetor acima é do tipo `int *`, ou seja, um ponteiro para inteiro!

Informações extras: ponteiros para ponteiros

Como cada posição do vetor é um ponteiro para inteiro, podemos associar cada posição dinamicamente com um vetor de inteiros.

```
1  int **p;
2  int i;
3  p = calloc(5, sizeof(int *));
4  for (i = 0; i < 5; i++)
5      p[i] = calloc(3,
       ↪  sizeof(int));
```



Informações extras: alocação dinâmica de matrizes

Esta é uma forma de se criar matrizes dinamicamente:

- Crie um ponteiro para ponteiro.
- Associe um vetor de ponteiros dinamicamente com este ponteiro de ponteiro. O tamanho deste vetor é o número de linhas da matriz.
- Cada posição do vetor será associada com um outro vetor do tipo a ser armazenado. Cada um destes vetores é uma linha da matriz (portanto possui tamanho igual ao número de colunas).

OBS: No final você deve desalocar toda a memória alocada!!

Informações extras: alocação dinâmica de matrizes

```c
int main() {
    int **p, i, j;

    p = calloc(5, sizeof(int *));
    for (i = 0; i < 5; i++)
        p[i] = calloc(3, sizeof(int));
    /* Alocou matriz 5x3 acima */

    printf("Digite os valores da matriz\n");
    for (i = 0; i < 5; i++)
        for (j = 0; j < 3; j++)
            scanf("%d", &p[i][j]);

    printf("Matriz lida\n");
    for (i = 0; i < 5; i++) {
        for (j = 0; j < 3; j++)
            printf("%d, ", p[i][j]);
        printf("\n");
    }

    /* Desalocando a memória usada: */
    for (i = 0; i < 5; i++)
        free(p[i]);
    free(p);
    return 0;
}
```

Exercícios

Exercício 1

Qual o resultado da execução do programa abaixo? Ocorre algum erro?

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int *misterio(int n) {
    int i, *vet;

    vet = malloc(n * sizeof(int));

    vet[0] = 1;
    for (i = 1; i < n; i++)
        vet[i] = i * vet[i-1];

    return vet;
}

int main() {
    int i, n, *v;
    scanf("%d", &n);
    v = misterio(n);
    for (i = 0; i < n; i++)
        printf("%d\n", v[i]);
    free(v);
    return 0;
}
```

Exercício 2

Faça um programa que lê a dimensão *n* de um vetor, em seguida aloca dinamicamente dois vetores do tipo *double* de dimensão *n*, faz a leitura de cada vetor e, finalmente, imprime o resultado da soma dos dois vetores.

Exercício 3

Faça uma função que recebe como parâmetro dois vetores de inteiros representando conjuntos de números inteiros e devolve um outro vetor com o resultado da união dos dois conjuntos.

O vetor resultante deve ser alocado dinamicamente.

O protótipo da função é

```
1  int *uniao(int *v1, int n1, int *v2, int n2);
```

onde **n1** e **n2** indicam o número de elementos em **v1** e **v2**, respectivamente.

Exercício 4

Vimos uma aplicação que aumenta e diminui o tamanho do vetor conforme necessário durante a execução.

Implemente a função de remoção de um elemento do vetor.

Informações extras: alocação dinâmica de matrizes

Informações extras: alocação dinâmica de matrizes

Vimos que alocar ponteiros para ponteiros é uma forma de se fazer alocação dinâmica de matrizes.

Mas a forma mais eficiente de criar matrizes é:

- Para uma matriz de dimensões $n \times m$, crie dinamicamente um vetor *unidimensional* deste tamanho.
- Use linearização de índices para trabalhar com o vetor como se fosse uma matriz.
- Desta forma, tem-se um melhor aproveitamento da cache pois a matriz inteira está sequencialmente em memória.

No final você deve desalocar toda a memória alocada!!

Linearização de índices

- Podemos sempre usar vetores simples para representar matrizes (na prática o compilador faz isto por você).
- Ao declarar uma matriz como `int mat[3][4]`, sabemos que serão alocadas 12 posições de memória associadas com a variável `mat`.
- Poderíamos simplesmente criar `int mat[12]` então.
- Apenas perderíamos a simplicidade de uso dos índices em forma de matriz.
    - Você não poderá escrever `mat[1][3]`, por exemplo.

Linearização de índices

- A *linearização de índices* é justamente a representação de matrizes usando-se um vetor simples.
- Mas devemos ter um padrão para acessar as posições deste vetor como se sua organização fosse na forma de matriz.

Linearização de índices

- Considere o exemplo: `int mat[12]; /* ao invés de int mat[3][4] */`
- Fazemos a divisão por linhas como segue:
  - Primeira linha: `mat[0]` até `mat[3]`
  - Segunda linha: `mat[4]` até `mat[7]`
  - Terceira linha: `mat[8]` até `mat[11]`
- Para acessar uma posição "`[i][j]`", usamos:
  - `mat[i*4 + j];` onde $0 \leq i \leq 2$ e $0 \leq j \leq 3$.

Linearização de índices

- De forma geral, seja matriz `mat[n*m]`, representando `mat[n][m]`.
- Para acessar a posição correspondente à `[i][j]` usamos:
  - `mat[i*m + j];` onde $0 \leq i \leq n-1$ e $0 \leq j \leq m-1$.
- Note que i pula de blocos de tamanho m, e j indexa a posição dentro de um bloco.

Linearização de índices

```c
int main() {
    int mat[40]; /* representando mat[5][8] */
    int i, j;

    for (i = 0; i < 5; i++)
        for (j = 0; j < 8; j++)
            mat[i*8 + j] = i*j;

    for (i = 0; i < 5; i++) {
        for (j = 0; j < 8; j++)
            printf("%d, ", mat[i*8 + j]);
        printf("\n");
    }

    return 0;
}
```