

Processamento Vectorial

Arquitetura de Computadores
Mestrado Integrado em
Engenharia Informática

Material de Apoio

- “*Computer Systems: a Programmer's Perspective*”; Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron--Pearson (3rd ed., 2016)
Web aside: <http://csapp.cs.cmu.edu/3e/waside/waside-simd.pdf>
- “*Computer Organization and Design: The Hardware / Software Interface*”
David A. Patterson, John L. Hennessy; 5th Edition, 2013
 - Secções 3.7 e 3.8 (págs. 224 a 228)
 - Secção 6.3 (págs. 509 a 515) – SISD, MIMD, SIMD, SPMD and Vector

Processamento Escalar

Cada instrução processa apenas **um** elemento do conjunto de dados

```
for (i=0 ; i < N ; i++) {  
    c[i] = a[i] + b[i];  
}
```

loop:

```
movl (%esi, %ecx, 4), %eax
```

```
movl (%edi, %ecx, 4), %edx
```

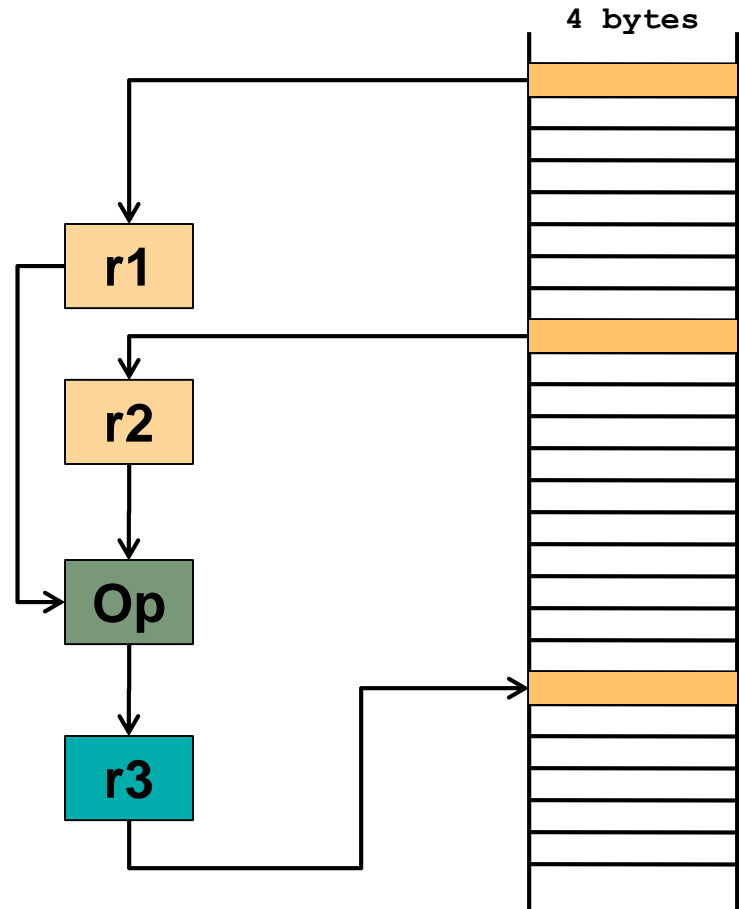
```
addl %eax, %edx
```

```
movl %edx, (%ebx, %ecx, 4)
```

```
incl %ecx
```

```
cmpl N, %ecx
```

```
j1 loop
```



Processamento Vectorial

DATA LEVEL PARALLELISM

Cada instrução processa **N** elementos do conjunto de dados

```
for (i=0 ; i < SIZE ; i++) {  
    c[i] = a[i] + b[i];  
}
```

loop:

```
mov.v (%esi, %ecx, 4), %vec0
```

```
mov.v (%edi, %ecx, 4), %vec1
```

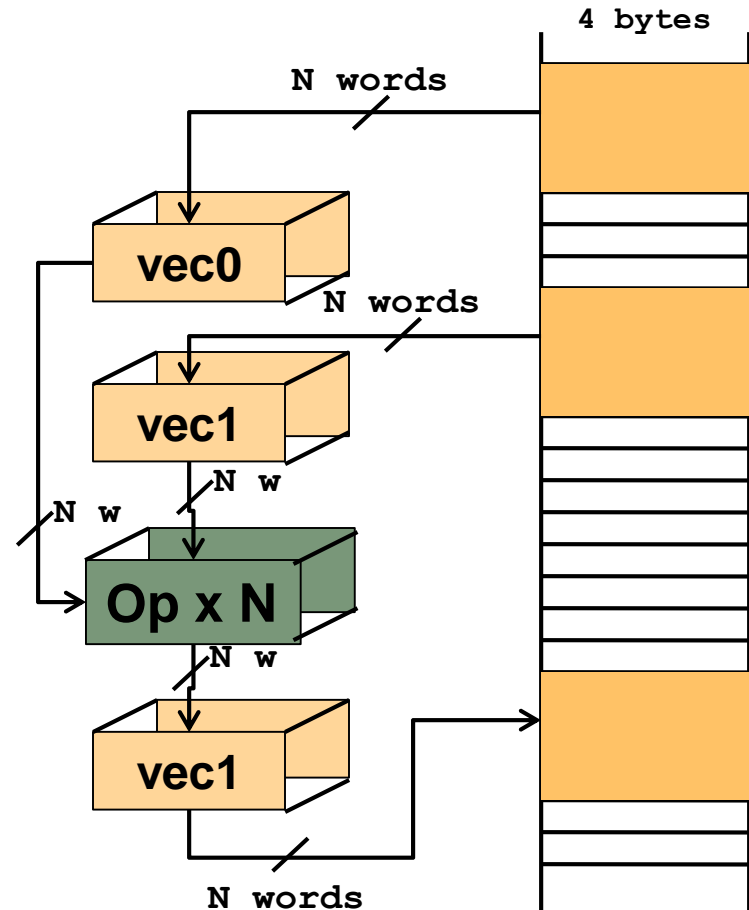
```
add.v %vec0, %vec1
```

```
mov.v %vec1, (%ebx, %ecx, 4)
```

```
addl $N, %ecx
```

```
cmpl SIZE, %ecx
```

```
j1 loop
```

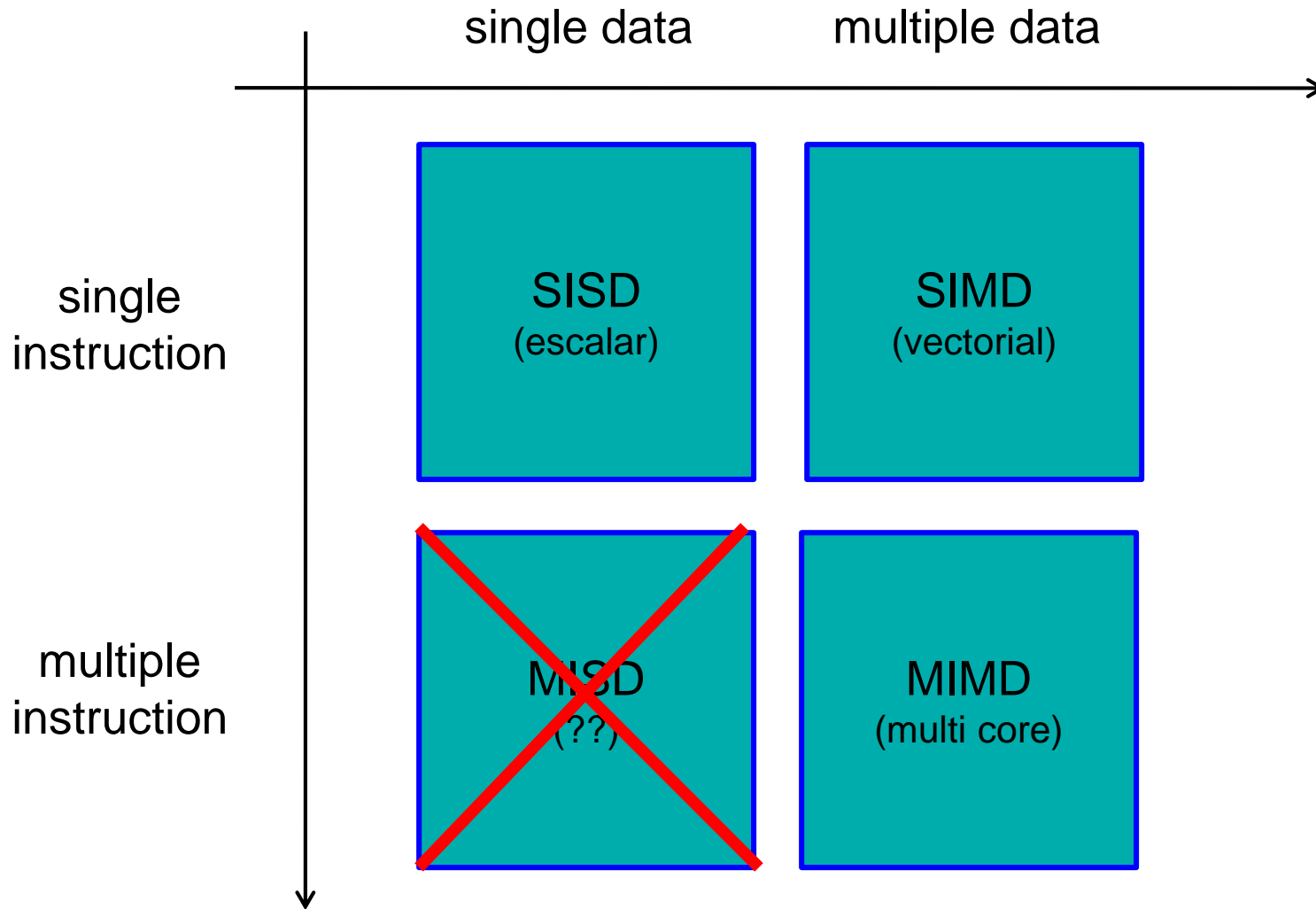


Processamento Vectorial

$$T_{EXEC} = CPI * \# I / f$$

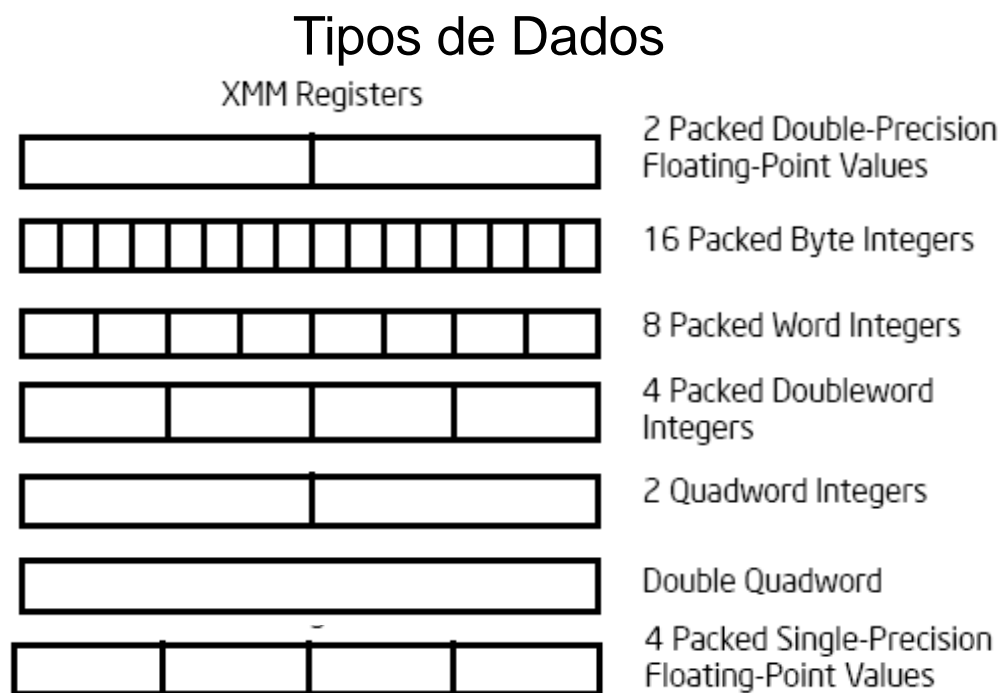
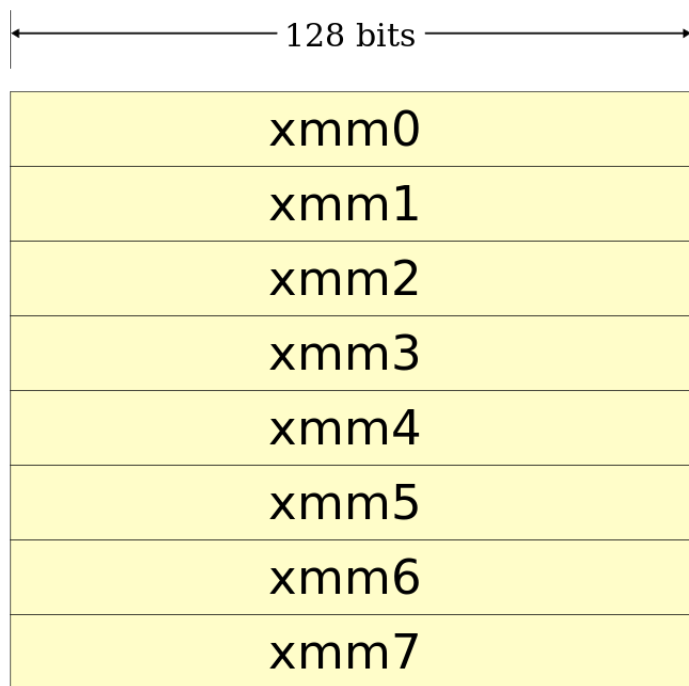
- **#I** – reduz, cada instrução processa **N** elementos de dados
- **CPI** – Depende da implementação:
 - Se as unidades funcionais vectoriais realizarem as **N** operações em paralelo, **o CPI mantém-se**
 - Se as unidades funcionais vectoriais realizarem as **N** operações sequencialmente, **o CPI aumenta**

Paralelismo – Taxonomia de Flynn



Intel SSE - Streaming SIMD Extensions

- SSE adiciona à arquitetura Intel 8 registros de 128 *bits*: *%xmm0* .. *%xmm7*
- adiciona ainda instruções para operar sobre vetores de vários tipos de dados



Intel SSE

1994 – Pentium II e Pentium with MMX – MultiMedia eXtensions

8 registos de 64 bits (%mm0 .. %mm7) que mapeiam nos registos de vírgula flutuante (%st0 .. %st7) ; apenas operações sobre inteiros

1995 – Introdução de Streaming Simd Extensions (SSE) no Pentium III

8 novos registos de 128 bits (%xmm0 .. %xmm7) e operações FP

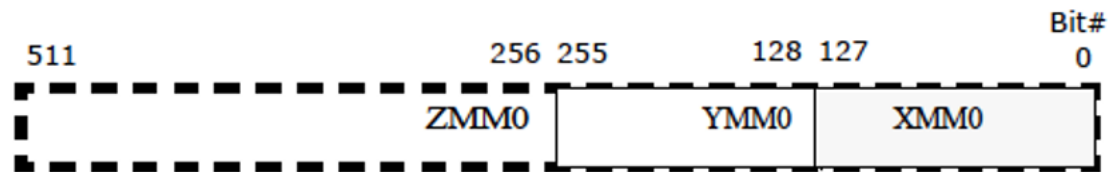
2000 – Introdução de SSE2 no Pentium IV

2004 - Introdução de SSE3 no Pentium IV HT

2007 - Introdução de SSE4

Intel Advanced Vector Extensions (AVX)

- Intel AVX – 16 registros `YMM0 . . YMM15` de 256 *bits*
incluindo todas as operações e tipos de dados SSE, referido como AVX128
(Sandy Bridge, 2011)
- Intel AVX2 – suporte para inteiros e *Fused-Multiply-Add (FMA)*
(Haswell, 2013)
- Intel AVX512 – 32 registros `ZMM0 . . ZMM31` de 512 *bits*
(Knights Landing, Xeon Phi, June, 2016)



YMMx : 8 SPFP (ou 8 int se AVX2)

SPFP7	SPFP6	SPFP5	SPFP4	SPFP3	SPFP2	SPFP1	SPFP0
YMMx : 4 DPFP							
DPFP3		DPFP2		DPFP1		DPFP0	

Instruções AVX: Notação

- A operação de adição (`ADD`) é usada como exemplo
- `%xmm?` refere registos de 128 *bits*, `%ymm?` registos de 256 *bits*
- `m128` refere 128 *bits* (16 *bytes*) em memória, `m256` refere 32 *bytes* em memória
- Instruções sem o prefixo `V` operam sobre quantidades de 128 *bits* e usam o formato de dois operandos:
 - `ADDPS %xmm? / m128, %xmm?` – adiciona o operando da esquerda com o da direita e guarda o resultado no operando da **DIREITA**
- Instruções com o prefixo `V` operam sobre quantidades de 128 ou 256 *bits* e usam o formato de três operandos:
 - `VADDPS %xmm?, %xmm? / m128, %xmm?`
 - `VADDPS %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – adiciona os 2 operando da direita guarda o resultado no operando da **DIREITA**

Instruções AVX: Notação

- Instruções com o sufixo **S** operam sobre valores em vírgula flutuante precisão simples; o sufixo **D** indica vírgula flutuante precisão dupla:
 - `VADDPS %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – realiza **8** operações em SPFP
 - `VADDPD %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – realiza **4** operações em DPFP
- Muitas instruções admitem a forma escalar, isto é, apenas realizam **UMA** operação sobre o valor armazenado nos *bits* menos significativos dos operandos. O penúltimo caracter pode tomar os valores **S** ou **D**, para indicar operação escalar (**UMA ÚNICA OPERAÇÃO**) ou vectorial, respectivamente:
 - `VADDPS %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – realiza **8** operações em SPFP
 - `VADDSS %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – realiza **1** operação em SPFP
 - `VADDSD %ymm?, %ymm? / m256, %ymm?` – realiza **1** operação em DPFP

Instruções AVX: Transferência de Dados

- [V] MOV [A | U] P [S | D]

Mover quantidades de 128 ou 256 *bits* (prefixo V), representando valores SPFP ou DPFP (sufixo S ou D), de endereços alinhados ou não (modificador A ou U)

- VMOVUPD m256, %ymm? – move 4 DPFP de memória (endereço não alinhado) para %ymm?
 - MOVAPD %xmm?, m128 – move 2 DPFP de %xmm? para memória (endereço alinhado)
- **Alinhamento:** um bloco de dados com **B bytes**, diz-se alinhado, se o endereço inicial desse bloco em memória é múltiplo de **B**.
 - Acessos alinhados são **significativamente** mais eficazes do que acessos não alinhados.
 - AVX2 permite o uso de instruções A (*aligned*) com acessos não alinhados, com penalização no desempenho. SSE e AVX resulta numa exceção.

Instruções AVX: Operações FP

Instruções	Operandos
[V]ADD[S P][S D]	Sem V? : xmm/m128, xmm
[V]SUB[S P][S D]	Com V? : ymm, ymm/m256, ymm
[V]MUL[S P][S D]	
[V]DIV[S P][S D]	[S P] : escalar ou vectorial ?
[V]SQRT[S P][S D]	
[V]MAX[S P][S D]	[S D] : SPFP ou DPFP ?
[V]MIN[S P][S D]	
[V]AND[S P][S D]	Endereços em memória alinhados
[V]OR[S P][S D]	
...	O resultado não pode ser em memória

Exemplo AVX

```
float a[1000] __attribute__((aligned(32)));
float b[1000] __attribute__((aligned(32)));
float r[1000] __attribute__((aligned(32)));

func (int n, float *a, float *b, float *r) {
    int i;
    for (i=0 ; i<n ; i++)
        r[i] = a[i] * b[i];
}
```

func:

...

movl 8(%rbp), %rdx # n

movl 12(%rbp), %rax # a

movl 16(%rbp), %rbx # b

movl 20(%rbp), %rsi # r

movl \$0, %rcx

ciclo:

vmovaps (%rax, %rcx, 4), %ymm0

vmulps (%rbx, %rcx, 4), %ymm0, %ymm1

vmovaps %ymm0, (%rsi, %rcx, 4)

addl \$8, %rcx

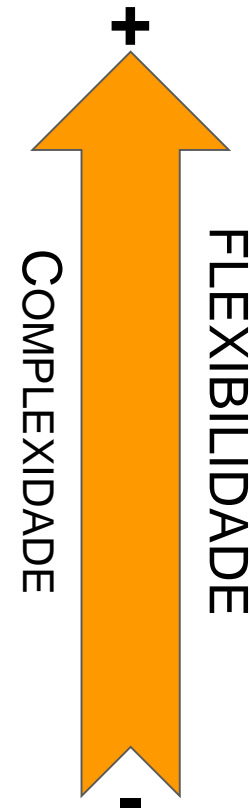
cmpl %rdx, %rcx

j1 ciclo

...

Processamento Vectorial - desenvolvimento

- *Assembly*
 - Utilização directa de instruções *assembly*
- *Compiler Intrinsics*
 - Pseudo-funções disponibilizadas pelo compilador que permitem o desenvolvimento explícito de código vectorial a um nível semântico mais elevado que o *assembly*
- *Auto Vectorização*
 - Vectorização pelo compilador



Compiler Intrinsics

- *Compiler intrinsics* são pseudo-funções que expõem funcionalidades do CPU incompatíveis com a semântica da linguagem de programação usada (C/C++ neste caso)

Para detalhes ver **Intel Intrinsics Guide** (<https://software.intel.com/sites/landingpage/IntrinsicsGuide/#>)

Compiler Intrinsics

- As funções e tipos de dados definidos como *intrinsics* são acessíveis incluindo os *headers* apropriados:

xmmintrin.h	Streaming SIMD Extensions	SSE
emmintrin.h	Streaming SIMD Extensions 2	SSE2
pmmmintrin.h	Streaming SIMD Extensions 3	SSE3
smmintrin.h	Streaming SIMD Extensions 4 (vector math)	SSE4.1
nmmintrin.h	Streaming SIMD Extensions 4 (string processing)	SSE4.2
immintrin.h	Advanced Vector Extensions 1 e 2	AVX2

Tipos de Dados	
__m64	Vector de 64 bits – inteiros (MMX)
__m128	Vector 128 <i>bits</i> – 4 FP SP (SSE)
__m256	Vector 256 <i>bits</i> – 8 FP SP (AVX)

Compiler Intrinsics

Operações Aritméticas (single FP)		
Pseudo-função	Descrição	Instrução
<code>__m256 _mm_add_ps (__m256, __m256)</code>	Adição	VADDPS
<code>__m256 _mm_sub_ps (__m256, __m256)</code>	Subtracção	VSUBPS
<code>__m256 _mm_mul_ps (__m256, __m256)</code>	Multiplicação	VMULPS
<code>__m256 _mm_div_ps (__m256, __m256)</code>	Divisão	VDIVPS
<code>__m256 _mm_sqrt_ps (__m256)</code>	Raiz Quadrada	VSQRTPS
<code>__m256 _mm_rcp_ps (__m256)</code>	Inverso	VRCPPS
<code>__m256 _mm_rsqrt_ps (__m256)</code>	Inverso Raiz Quadrada	VRSQRTPS

Compiler Intrinsics

Movimento de Dados (single FP)

Pseudo-função	Descrição	Instrução
<code>__m256 _mm256_load_ps (float *)</code>	Carrega vector de memória para registo (alinhado 32)	VMOVAPS
<code>__m256 _mm_broadcast_ps (float *)</code>	Carrega 1 FP de memória para os 8 elementos do registo YMM	VBROADCASTSS
<code>_mm256_store_ps (float *, __m256)</code>	Escreve registo em vector de memória (alinhado 32)	VMOVAPS
<code>__m256 _mm256_set1_ps (float)</code>	Todos os 8 elementos do registo YMM são iniciados com o mesmo float	---

Compiler Intrinsics: Exemplo 1

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

func() {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        c[i] = a[i] + b[i];
    } }
```

```
#include <immintrin.h>
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

func() {
    for (int i=0 ; i<SIZE ; i+=8) {
        __m256 mb = _mm256_load_ps (&b[i]);
        __m256 ma = _mm256_load_ps (&a[i]);
        __m256 mc = _mm256_add_ps (ma, mb);
        _mm256_store_ps (&c[i], mc);
    } }
```

Compiler Intrinsics: Exemplo 2

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

float alfa;
```

```
func() {
    for (int i=0 ; i<SIZE ; i++)
        c[i] = alfa * a[i];
}
```

```
#include <immintrin.h>
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float alfa;

func() {
    __m256 m_alfa = _mm256_broadcast_ps (&alfa);
    for (int i=0 ; i<SIZE ; i+=8) {
        __m256 mb = _mm256_load_ps (&b[i]);
        __m256 ma = _mm256_load_ps (&a[i]);
        ma = _mm256_mul_ps (ma, m_alfa);
        __m256 mc = _mm256_add_ps (ma, mb);
        _mm256_store_ps (&c[i], mc);
    }
}
```

Compiler Intrinsics: Exemplo 3

```
#include <math.h>
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

func() {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
```

```
        #include <ia32intrin.h>
    } } #define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

func() {
    __m256 cinco = _mm256_set1_ps (5.);
    for (int i=0 ; i<SIZE ; i+=8) {
        __m256 mb = _mm256_sqrt_ps(_mm256_load_ps (&b[i]));
        __m256 ma = _mm256_load_ps(&a[i]);
        __m256 mr = _mm256_mul_ps (cinco, _mm256_add_ps (ma, mb);
        _mm256_store_ps (&c[i], mr);
    } }
```

Auto-vectorização

- O compilador pode vectorizar o código
- Comando gcc:

```
gcc -O3 -march=...
```

Ou

```
gcc -ftree-vectorize -march=...
```

Auto-vectorização

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        c[i] = a[i] + b[i];
    } }
```

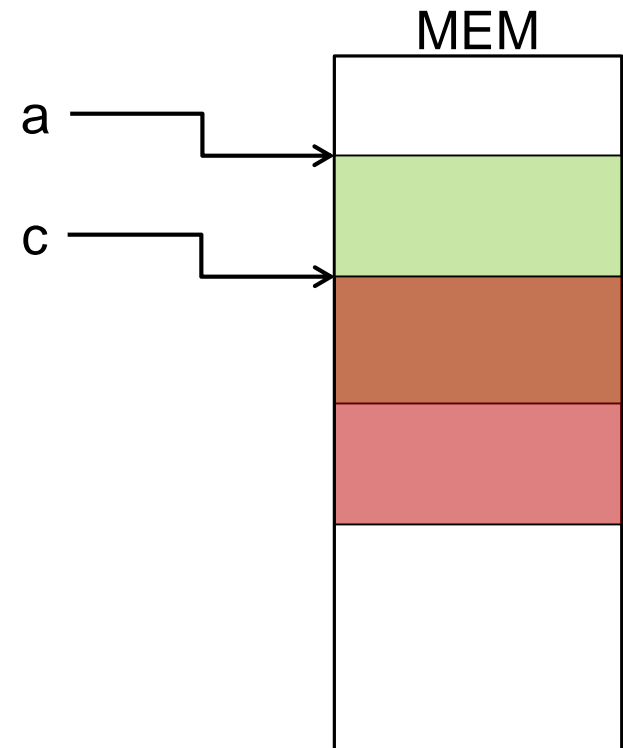
```
loop:
    xor %eax, %eax
.L1:
    vmovaps a(%eax), %ymm0
    vaddps b(%eax), %ymm0
    vmovaps %ymm0, c(%eax)
    add $32, %eax
    cmp $4000000, %eax
    jl .L1
    ret
```


Auto-vectorização

```
loop (float *a, float *b, float *c, const int S) {  
    for (int i=0 ; i< S ; i++) {  
        c[i] = a[i] + b[i];  
    }  
}
```

Possibilidade de ***aliasing***, isto é:
as regiões de memória apontadas
pelos diferentes apontadores podem-
se sobrepor!

versioning, isto é:
O compilador gera versões escalares e
vectoriais do ciclo e código para
verificar o *aliasing*.
Em *runtime* é escolhida a versão mais
apropriada do ciclo



Auto-vectorização

```
loop ( float * __restrict__ a, float * __restrict__ b,  
      float * __restrict__ c, const int S) {  
    for (int i=0 ; i< S ; i++) {  
        c[i] = a[i] + b[i];  
    }  
}
```

O qualificador `__restrict__` indica ao compilador que durante a existência daquele apontador

NÃO EXISTE QUALQUER OUTRA REFERÊNCIA

para a zona de memória acedida a partir desse apontador.

Logo não existe a possibilidade de *aliasing*

Bloqueadores Auto-vectorização: dados não contíguos

```
#define SIZE 1000000
typedef struct {float a, b, c, pad;} MYDATA;

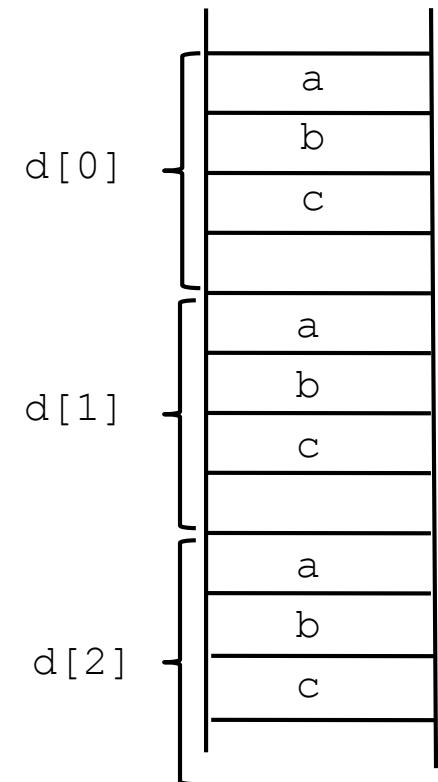
MYDATA d[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        d[i].c = d[i].a + d[i].b;
    }
}
```

Array of Structures (AoS) :

os vários elementos do mesmo campo não são armazenados consecutivamente em memória.

Código não vectorizável!

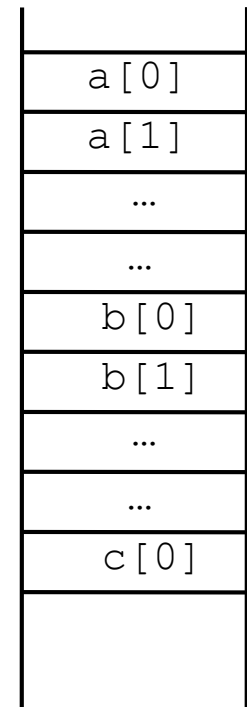


Bloqueadores Auto-vectorização: dados não contíguos

```
#define SIZE 1000000
struct {
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
} d;

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        d.c[i] = d.a[i] + d.b[i];
    }
}
```

Structures of Arrays (SoA) :
os vários elementos do mesmo campo são armazenados consecutivamente em memória.
Código vectorizável!



Bloqueadores Auto-vectorização: dados contíguos

```
#define SIZE 10000000
struct {
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
} d;

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        d.c[i] = d.a[i] + d.b[i];
    } }
```

```
loop:
    xor %eax, %eax
.L1:
    vmovaps d(%eax), %ymm0
    vaddps d+4000000(%eax), %ymm0
    vmovaps %ymm0, d+8000000(%eax)
    add $32, %eax
    cmp $4000000, %eax
    jl .L1
    ret
```

Bloqueadores Auto-vectorização: *stride*

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i+=2) {
        a[i] = a[i] + 1;
    } }
```

Stride != 1

Acessos **não contíguos**, mas **ordenados**.

Compilador pode não vectorizar o código.

Código (mesmo vectorial) menos eficiente, devido a acessos a memória e reduzida localidade espacial.

Bloqueadores Auto-vectorização: *uncountable loops*

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; a[i]!=0 && i< SIZE ; i++) {
        c[i] = a[i] + b[i];
    } }
```

O número de iterações não pode ser computado
(*uncountable loop*):
Código não vectorizável!

Bloqueadores Auto-vectorização: condições

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        float s = a[i] + b[i];
        if (s<0.) {c[i] = s;}
        else if (s==0.) {c[i] = -10.;}
        else {c[i] = -s;}
    } }
```

Estruturas condicionais:
Código não vectorizável!

Bloqueadores Auto-vectorização: condições

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        float s = a[i] + b[i];
        c[i] = (s < 0 ? s : 0);
    } }
```

Algumas estruturas condicionais simples realizáveis como uma máscara: Código vectorizável nesses casos

NOTA:

s é calculado para todos os elementos do vector.

usando uma máscara só é atribuído aqueles elementos de c para os quais s é <0!

Bloqueadores Auto-vectorização: funções

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        c[i] = myfunc(a[i]) + b[i];
    }
}
```

Invocação de funções dentro do ciclo:
Código não vectorizável!

Bloqueadores Auto-vectorização: funções

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float b[SIZE] __attribute__((aligned(32)));
float c[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE ; i++) {
        c[i] = __builtin_absf(a[i]) + b[i];
    }
}
```

Invocação de funções intrínseca dentro do ciclo:
Código vectorizável!

Bloqueadores Auto-vectorização: dependências

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=1 ; i< SIZE ; i++) {
        a[i] = a[i-1] + 1;
    }
}
```

Dependência *read after write* (RaW)!

Como i cresce, o valor de $a[i+1]$ é alterado na próxima iteração anterior!

Código não vectorizável!

$a[1] = a[0] + 1;$

$a[2] = a[1] + 1;$

$a[3] = a[2] + 1;$

$a[4] = a[3] + 1;$

Bloqueadores Auto-vectorização: dependências

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=0 ; i< SIZE-1 ; i++) {
        a[i] = a[i+1] + 1;
    }
}
```

Dependência write *after read* (WaR)!

Como i cresce, o valor de $a[i+1]$ só será alterado na próxima iteração!

Código vetorizável!

$a[0] = a[1] + 1;$



$a[1] = a[2] + 1;$



$a[2] = a[3] + 1;$



$a[3] = a[4] + 1;$

Bloqueadores Auto-vectorização: dependências

- Distância da dependência : diferença entre o índice de escrita e o índice de leitura

$$d = c^W - c^R$$

- Se $d \leq 0$ não há dependências RaW : ciclo pode ser vectorizado

<pre>for (i=1 ; i < SIZE ; i++) { a[i] = 2 * a[i-1]; }</pre>	<pre>for (i=0 ; i < SIZE-1 ; i++) { a[i] = 2 * a[i+1]; }</pre>
$d = i - (i-1) = 1$ $d > 0 \Rightarrow \text{RaW}$	$d = i - (i+1) = -1$ $d < 0 \Rightarrow \text{WaR}$

- Nota: o sinal da distância deve respeitar a ordem de iteração.
Isto é, se o índice for decrementado então $d = -(c^W - c^R)$

Bloqueadores Auto-vectorização: dependências

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE]
    __attribute__((aligned(32)));

loop () { float c;

    for (int i=1 ; i< SIZE ; i++) {
        c = a[i-1]*2 ;
        a[i] = (c >0 ? c : 1);
    } }
```

$$d = c^W - c^R = i - (i - 1) = 1$$

$a[1] = a[0]*2 : 1;$

$a[2] = a[1]*2 : 1;$

read after write

Código NÃO vectorizável!

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE]
    __attribute__((aligned(16)));

loop () { float c;

    for (int i=SIZE -1 ; i>0; i--) {
        c = a[i-1]*2 ;
        a[i] = (c >0 ? c : 1);
    } }
```

$$d = -(c^W - c^R) = -i + i - 1 = -1$$

$a[SIZE-1] = a[SIZE-2]*2:1;$

$a[SIZE-2] = a[SIZE-3]*2:1;$

Write after read

Código vectorizável!

Bloqueadores Auto-vectorização: dependências

```
#define SIZE 1000000
float a[SIZE] __attribute__((aligned(32)));

loop () {
    for (int i=9 ; i< SIZE ; i++) {
        a[i] = a[i-9] + 1;
    }
}
```

Máquina AVX: largura das unidades funcionais $W= 8$

$$d = i - (i-9) = 9$$
$$d > 0 \Rightarrow \text{RaW}$$

$$\text{Mas } d > W ; 9 > 8$$

Código vectorizável

Processamento Vectorial: Linhas de Orientação

- Usar ciclos “for” contáveis: pontos únicos de entrada e saída;
- Evitar estruturas condicionais; no entanto, máscaras são vectorizáveis;
- Evitar dependências, especialmente do tipo “read-after-write”
- Evitar a utilização de apontadores e prevenir *aliasing*
- Usar acessos à memória eficientes:
 - Ciclo mais aninhado com *stride* 1 (dados consecutivos)
 - Alinhar os dados a múltiplos de 32 (Intel® AVX)