


Pipeline – criticità e forwarding

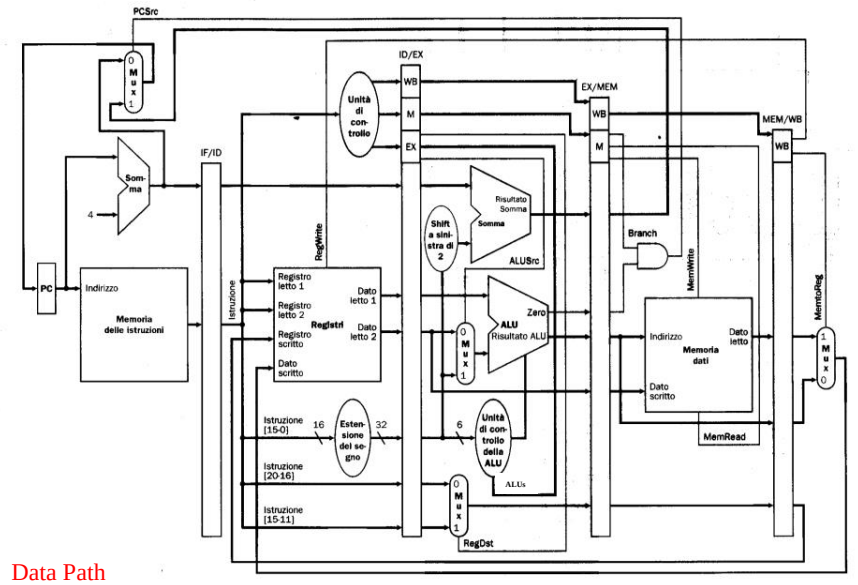
Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Informatica
alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento al Patterson: 4.5, 4.6


Sommario

Pipeline - struttura



Data Path

Gli stadi di esecuzione

IF – Instruction Fetch
ID – Instruction Decode (e lettura register file)
EX – Esecuzione o calcolo dell'indirizzo di memoria.
MEM – Accesso alla memoria dati.
WB – Write Back (scrittura del risultato nel register file).

NB: I registri al termine di ogni fase prendono il nome dalle 2 fasi:
IF/ID ID/EX EX/MEM MEM/WB
Perchè non c'è un registro WB/IF?

Il data-path e il control path procedono da sx a dx.

Il ruolo dei registri di pipeline

Ciascuno stadio produce un risultato. La parte di risultato che serve agli stadi successivi deve essere memorizzata in un registro insieme alle altre informazioni utili per l'esecuzione da quello stadio **fino alla fine**.

Un registro mantiene l'informazione anche se lo stadio riutilizza l'unità funzionale e scrive nel master del registro IF/ID.

Esempio: nella fase di fetch l'istruzione letta viene salvata alla fine della fase di fetch nel master del registro IF/ID (cf. Instruction Register). Alla commutazione del clock passa nello slave di IF/ID e lì rimane per un ciclo di clock anche se nella fase di fetch transita un'altra istruzione e scive nella parte master di IF/ID.

Criticità (hazard)

Un'istruzione non può essere eseguita nel ciclo di clock immediatamente successivo a quello dell'istruzione precedente (mancano i dati necessari alla lavorazione di un qualche suo stadio).

Strutturali:

- Dovrei utilizzare la stessa unità funzionale due volte nello stesso ciclo di clock (e.g. se non avessi duplicato la ALU nella fase di EXE).

Controllo:

- Dovrei prendere una decisione (sull'istruzione successiva) prima che l'esecuzione dell'istruzione corrente sia terminata (e.g. Istruzioni successive a una branch).

Dati:

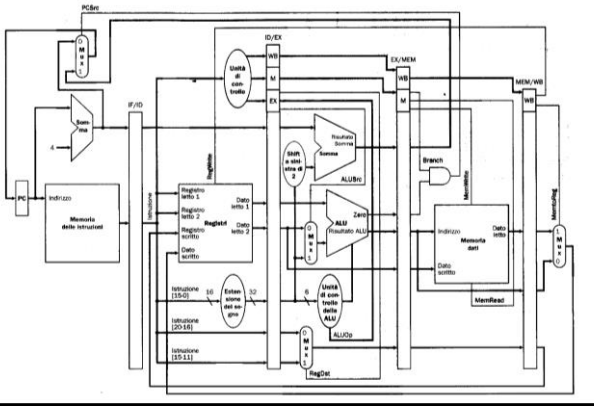
- Dovrei eseguire un'istruzione in cui uno dei dati è il risultato dell'esecuzione di un'istruzione precedente.

Soluzione delle criticità strutturali

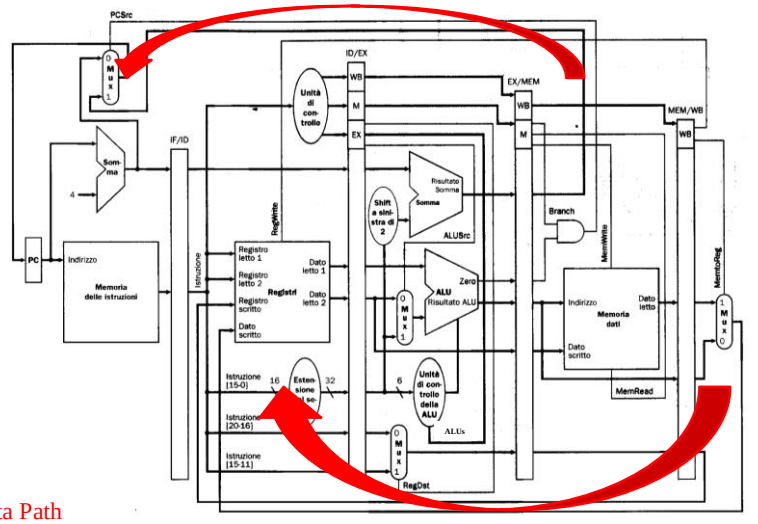
Le criticità strutturali sono risolte con la duplicazione (calcolo) o suddivisione (memoria) delle unità funzionali.

Triplicazione delle ALU

Duplicazione della Memoria (stessa memoria ma separazione della memoria dati dalla memoria istruzioni).



Pipeline – criticità o hazard



Data Path

La fase di WB genera un cammino da dx (WB) a sx (DEC) sul data path
Una beq genera un cammino da dx (MEM) a sx (FF) sul control path

Sommario

Criticità in una pipeline

Hazard sui dati

Propagazione

Esempio di hazard sui dati

In linguaggio C:
s0 = t3 – (t1 + t2);

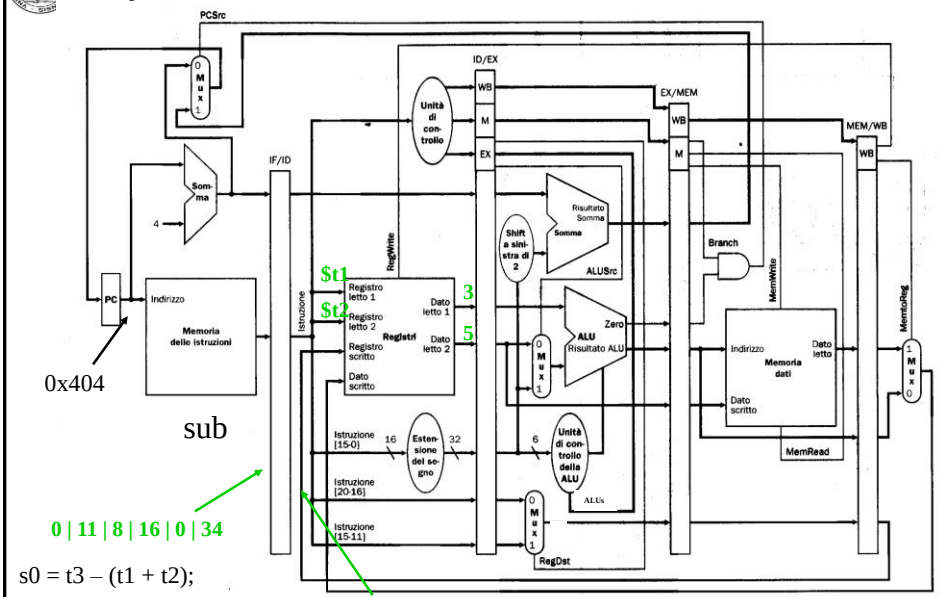
In linguaggio assembler:
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

Supponiamo all'inizio:
$t0 = 0; $t1 =3; $t2 = 5; $t3 = 8;

Alla fine deve risultare: $s0 = 8 – (3+5) = 0;

Data hazard - I

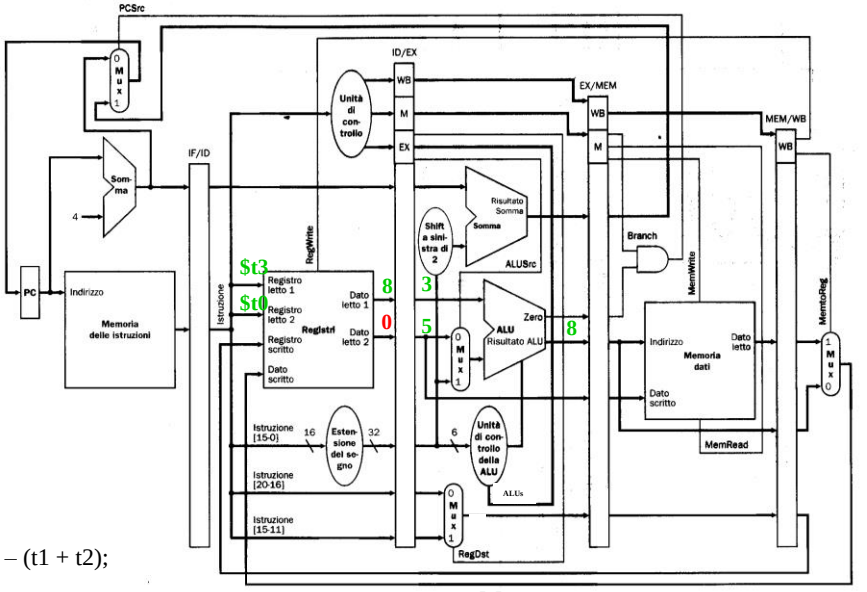
All'inizio: $t0 = 0; $t1 =3; $t2 = 5; $t3 = 8;
Dopo la add $t0 = 8



s0 = t3 – (t1 + t2);
0x400 add **$t0**, $t1, $t2 in ID
0x404 sub $s0, $t3, $t0 in IF

$s0 = 8 – (3+5) = 0;

Data Hazard - II



s0 = t3 – (t1 + t2);

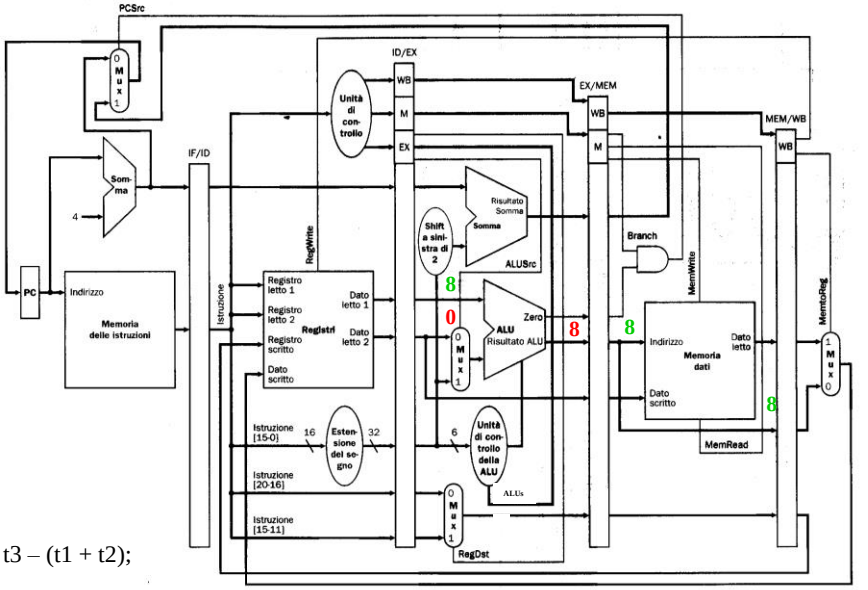
add ~~$t0~~, $t1, $t2 in EX
sub $s0, $t3, ~~$t0~~ in ID

sub add

All'inizio: $t0 = 0; $t1 =3; $t2 = 5; $t3 =
Dopo la add $t0 = 8

$s0 = 8 – (3+5) = 0;

Data Hazard - III



s0 = t3 – (t1 + t2);

add ~~$t0~~, $t1, $t2 in MEM
sub $s0, $t3, ~~$t0~~ in EXE

All'inizio: $t0 = 0; $t1 =3;
$t2 = 5; $t3 = 8;

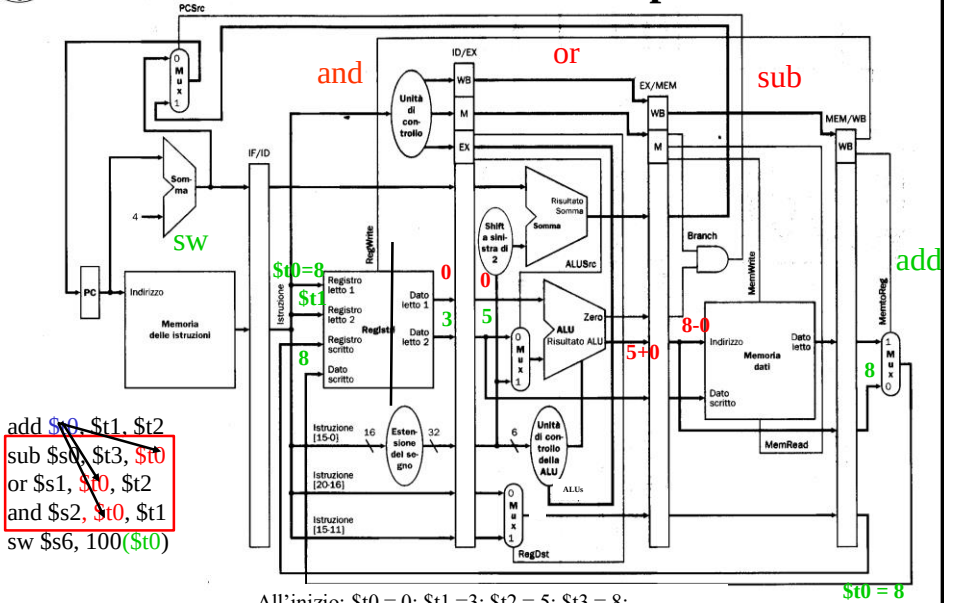
sub add

Dopo la add $t0 = 8

Come affrontare gli *hazard*

- Si può risolvere l'hazard…
  - ***…aspettare***
    - si mette lo stadio opportuno dell'istruzione dipendente dalla precedente in pausa
    - il controllo della pipeline deve individuare il problema prima che avvenga! **Stallo.**
  - ***…prevenire***
    - Il compilatore, come ottimizzazione, può **riordinare le istruzioni** in modo che il risultato sia lo stesso ma non ci siano hazard
  - ***…modificare la CPU***
  - …***scartare istruzioni***
    - si butta via l'attuale lavoro della pipeline e si ricomincia ("flushing" della pipeline)
    - è sufficiente individuare il problema DOPO che è avvenuto
    - Es: l'istruzione successiva (a sx) ha usato in lettura un registro che è stato appena modificato dall'istruzione precedente (dx)? ➔ **flush.**
    - Es: l'istruzione precedente (a dx) ha effettuato un salto e quindi successive (a sx) sta lavorando con un PC e IR sbagliato? → **flush.**
  - …***prevedere***
    - attraverso alcuni meccanismi di **predizione** preposti, l'architettura stessa tenta di predirre su base statistica i risultati rilevanti dell'istruzione in corso (es il PC – "branch prediction", o il valore prodotto dall'istruzione – "value prediction"). Se la predizione si rivela corretta: tutto ok. Se si rivela sbagliata: **roll-back.**

Analisi dei data hazard – le dipendenze



add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0
or $s1, $t0, $t2
and $s2, $t0, $t1
sw $s6, 100($t0)

All'inizio: $t0 = 0; $t1 =3; $t2 = 5; $t3 = 8;
Dopo la add $t0 = 8

Data Hazard – le dipendenze

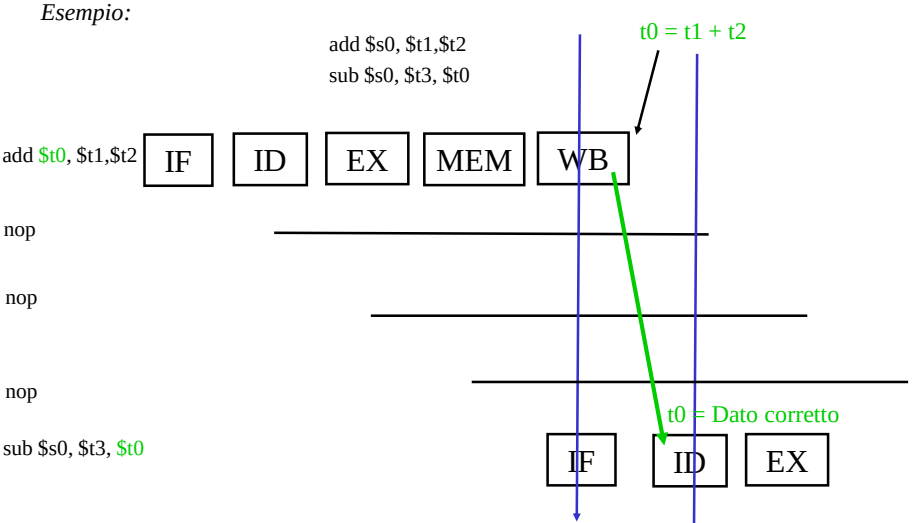
add $t0, $t1, $t2	IF	ID	EX $t1+$t2	MEM	WB write t0				
sub $s0, $t3, $t0		IF	ID	EX $t3 - $t0	MEM	WB			
or $s1, $t0, $t2			IF	ID	EX $t0 or $t2	MEM	WB		
and $s2, $t0, $t5				IF	ID	EX $t0 & $t5	MEM	WB	
sw $s6, 100($t0)					IF	ID	EX $t0 +100	MEM	WB

Le dipendenze sono **critiche (hazard)** quando il dato serve prima nel tempo di quando viene scritto nel RF

t\

Soluzione 1 – «aspettare» - stallo

Esempio:



Non carico istruzioni per 3 cicli di clock, la pipeline è **in stallo** per 3 cicli di clock, si inseriscono 3 bolle (**bubbles**) nella pipeline. E' una soluzione costosa in termini di throughput.

Soluzione 2 – «prevenire gli hazard» - riorganizzando il codice

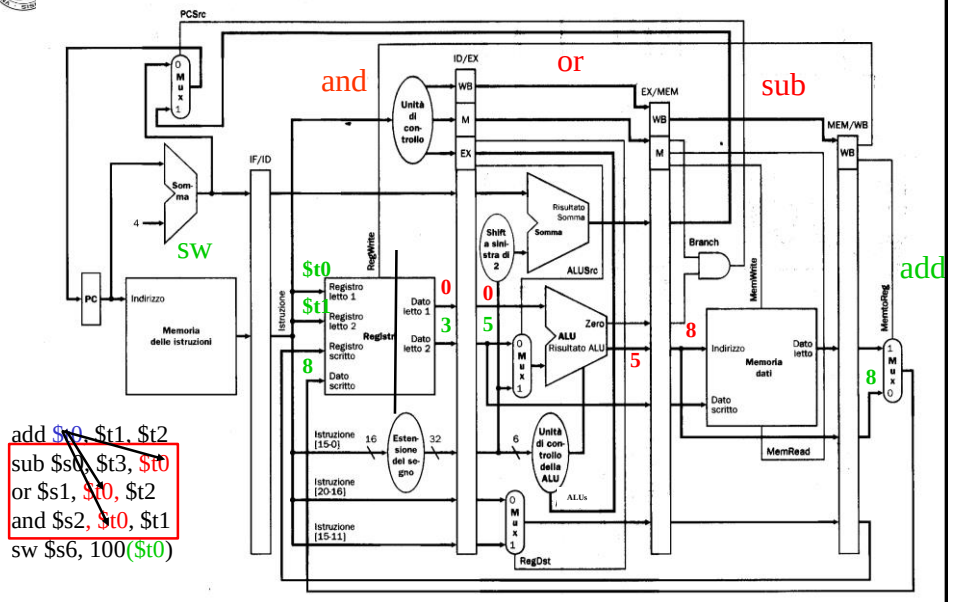
```
add $t0, $t1, $t2          add $t0, $t1, $t2          add $t0, $t1,$t2
sub $s0, $t3, $t0          nop                        add $s5, $t1, $t3
or $s1, $t0, $t2           nop                        addi $s3, $t4, 100
and $s2, $t0, $t1          nop                        or $s4, $t5, $t6
sw $s6, 100($t0)           sub $s0, $t3, $t0          sub $s0, $t3, $t0
add $s5, $t1, $t3          or $s1, $t0, $t2           or $s1, $t0, $t2
addi $s3, $t4, 100         and $s2, $t0, $t1          and $s2, $t0, $t1
or $s4, $t5, $t6           sw $s6, 100($t0)           sw $s6, 100($t0)
....                       add $s5, $t1, $t3          …
....                       addi $s3, $t4, 100         ....
                           or $s4, $t5, $t6
```

Con lo stallo spreco di 3 cicli di clock (in modo che la fase IF dell'istruzione *sub $s0, $t3, $t0* vada a coincidere con la fase di WB della *add $s0, $t1, $t2*. **Situazione troppo frequente perché la soluzione sia accettabile.**

Il codice viene riorganizzato in fase di compilazione. Non sempre è possibile o efficace.

Esecuzione fuori ordine.

Soluzione 3 – "Modificare la CPU"




```
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0
or $s1, $t0, $t2
and $s2, $t0, $t1
sw $s6, 100($t0)
```

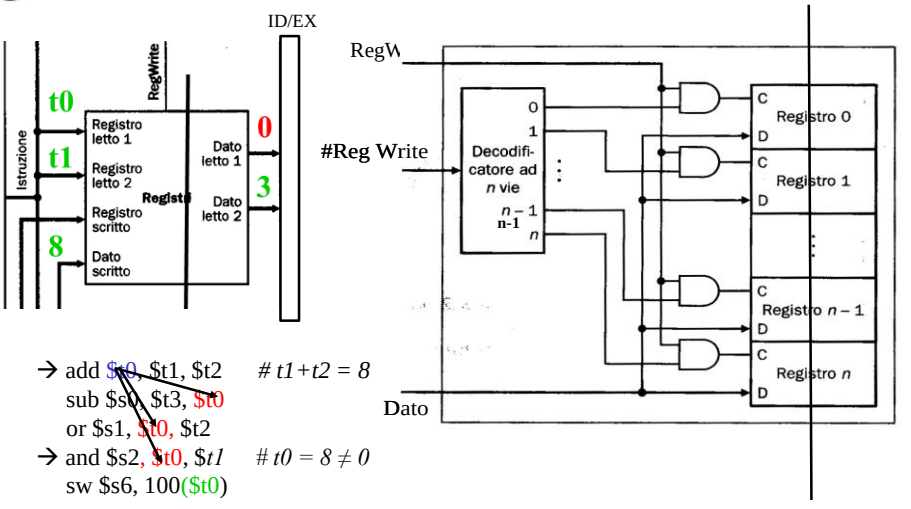
$t0 contiene 0 all'inizio
$t0 contiene 8 dopo la `add`

Data Hazard – le dipendenze

add $t0, $t1, $t2	IF	ID	EX t1+t2	MEM	WB write t0				
sub $s0, $t0, $t3		IF	ID t0 t3	EX t2 – t3	MEM	WB diff->s0			
or $s1, $t2, $t0			IF	ID t2 t0	EX t2 or t0	MEM	WB or -> s1		
and $s2, $t0, $t5				IF	ID t0 t5	EX t0 & t5	MEM	WB AND -> s2	
sw $s6, 100($t0)					IF	ID	EX t0+100	MEM $s6 -> Mem	WB

Il dato in $t0 viene scritto nel Register File nella fase di WB della add, è pronto al clock successivo. Non è ancora pronto quando viene effettuata la decodifica della sub, della or e della and.

Analisi dell'hazard sulla and

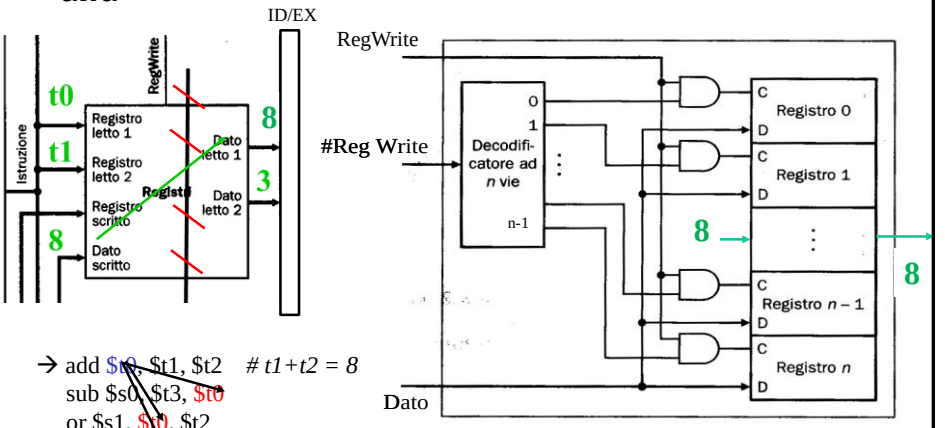


→ add $t0, $t1, $t2 *# t1+t2 = 8*
sub $s0, $t3, $t0
or $s1, $t0, $t2
→ and $s2, $t0, $t1 *# t0 = 8 ≠ 0*
sw $s6, 100($t0)

Il contenuto del registro letto $t0 si ferma nel registro ID/EX
Il dato scritto si ferma nella "pancia" dei flip-flop del RF.

Soluzione dell'hazard sulla and

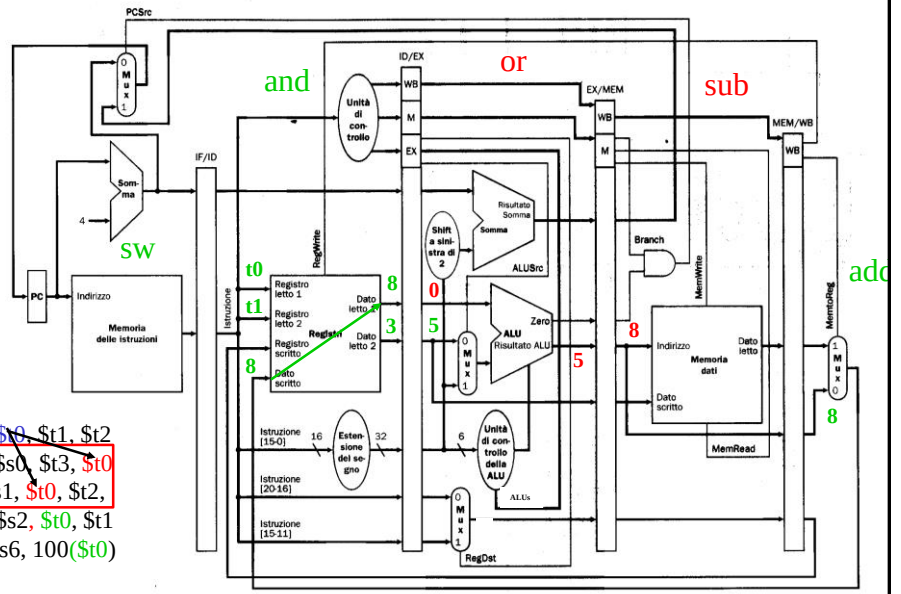
and



→ add $t0, $t1, $t2 *# t1+t2 = 8*
sub $s0, $t3, $t0
or $s1, $t0, $t2
→ and $s2, $t0, $*t1* *# t0 = 8 ≠ 0*
sw $s6, 100($t0)

Il contenuto aggiornato di $t0 (=8) è già nel register file (nella parte master). E' sufficiente lasciarlo passare in uscita. Dobbiamo utilizzare **latch** di tipo D e non flip-flop come nel caso della CPU singolo ciclo

Soluzione 3 – "Modificare la CPU"



Da 3 a 2 istruzioni scartate, `or` e `sub`, ancora troppe!

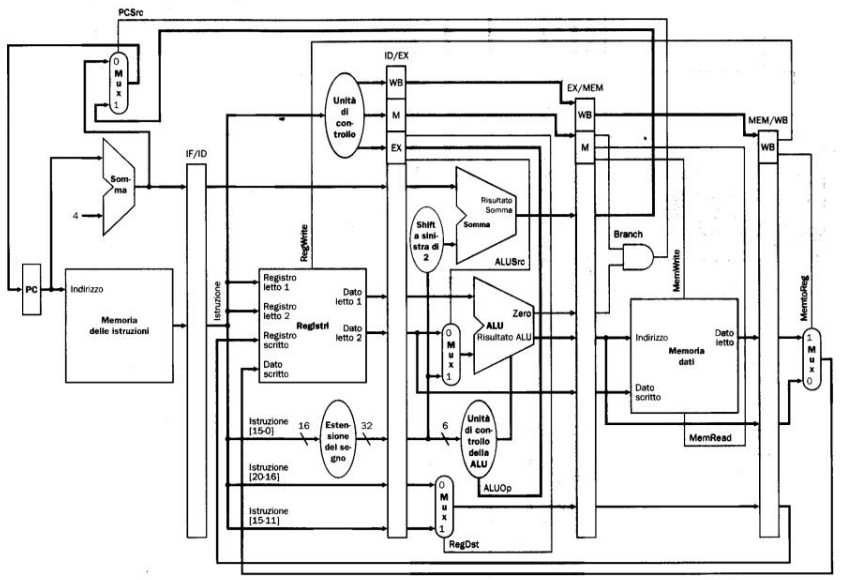
Sommario

Criticità in una pipeline

Hazard sui dati

Propagazione

CPU con pipeline



Data Hazard – le dipendenze

add $t0, $t1, $t2	IF	ID	EX t1+t2	MEM	WB write t0				
sub $s0, $t0, $t3		IF	ID t0 t3	EX t2 – t3	MEM	WB diff->s0			
or $s1, $t2, $t0			IF	ID t2 t0	EX t2 or t0	MEM	WB or -> s1		
and $s2, $t0, $t5				IF	ID t0 t5	EX t0 & t5	MEM	WB AND -> s2	
sw $s6, 100($t0)					IF	ID	EX t0+100	MEM $s6 -> Mem	WB

Le dipendenze sono **critiche (hazard)** quando il dato serve prima nel tempo

Soluzione architetturale della criticità sui dati

La criticità nei dati ha a che fare essenzialmente con la **disponibilità di dati corretti**.

1) **Identificazione** della criticità (funzione del tipo di istruzione e dei registri coinvolti).

2) **Correzione** della situazione: **propagazione a ritroso** dei dati richiesti (negli stadi della pipeline = in avanti nel tempo) ***su data-path alternativi***

Data Hazard – analisi

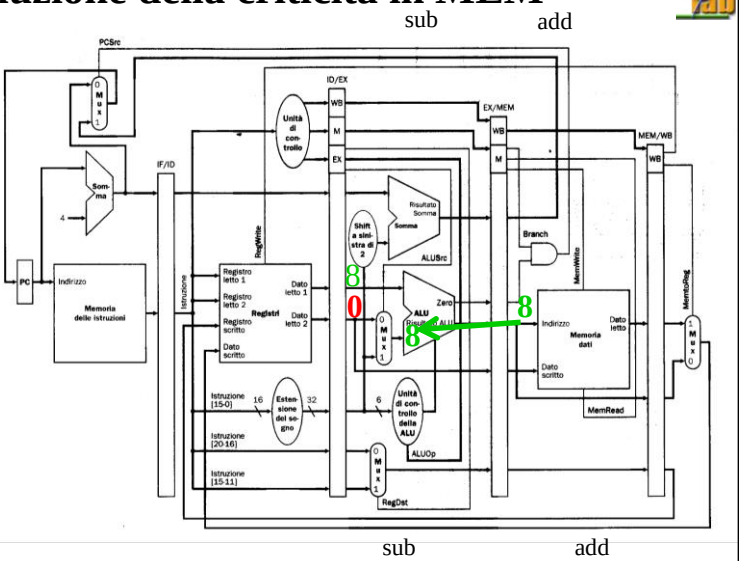
add $t0, $t1, $t2	IF	ID	EX t1+t2	MEM	WB write t0				
sub $s0, $t0, $t3		IF	ID	EX t0 – t3	MEM	WB diff->s0			
or $s1, $t2, $t0			IF	ID	EX t2 or t0	MEM	WB OR -> s1		
and $s2, $t0, $t5				IF	ID	EX t0 AND t5	MEM	WB AND -> s2	
sw $s6, 100($t0)				$t0 corretto	IF	ID	EX t0 + 100	MEM s6 ->Mem	WB

Alla fine della fase di EXE nella pipeline e' presente il valore corretto di $t0 che e' $t1 + $t2

Soluzione della criticità in MEM

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

*$t1 + *$t2 = 8



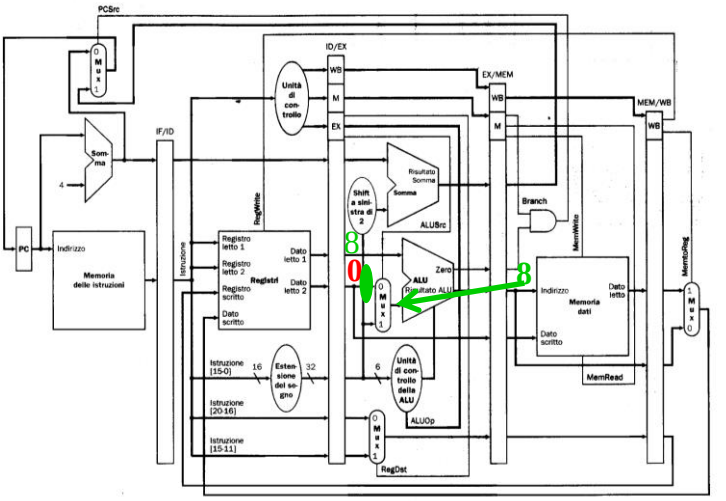
Cammino di **retro-propagazione** (feed-forwarding nel tempo) del risultato della ALU.
Il cammino non deve essere utilizzato sempre.

Propagazione da MEM

sub add

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

*$t1 + *$t2 = 8



sub add

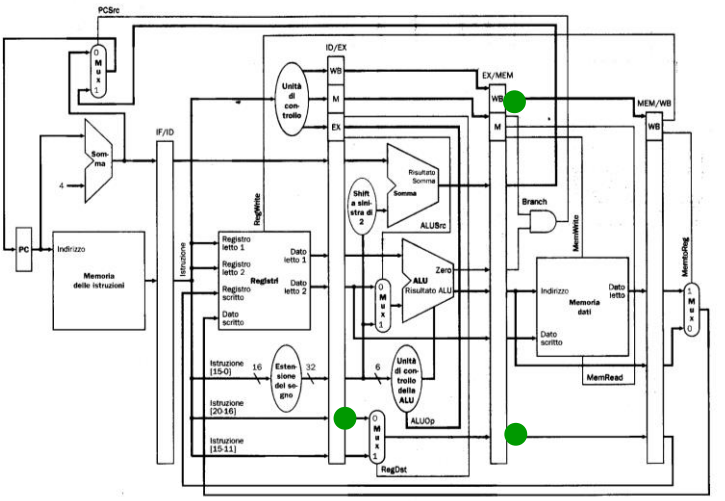
Operando 2 = ID/EX.rt (if not hazard)
EX/MEM.rd (if hazard)

Chi controlla il MUX verde? Come?

Identificazione delle criticità in MEM

if (EX/MEM.RegistroRd = ID/EX.RegistroRt) and
(EX/MEM.RegWrite == 1) then
"Hazard on operando2"

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

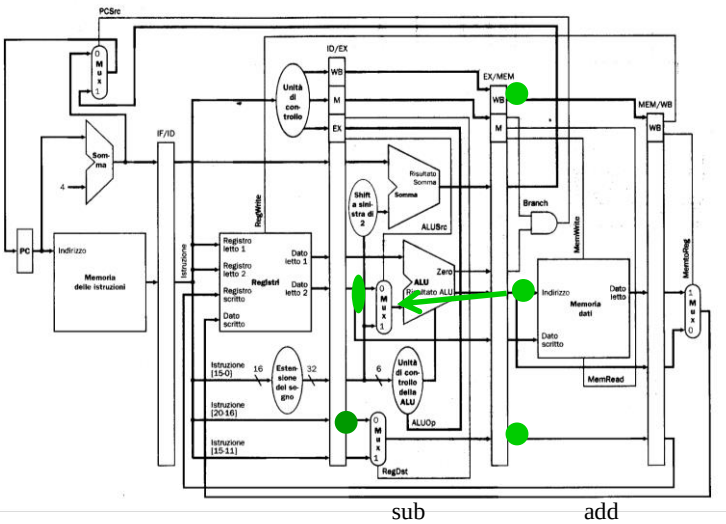


sub add

Putting the picture together

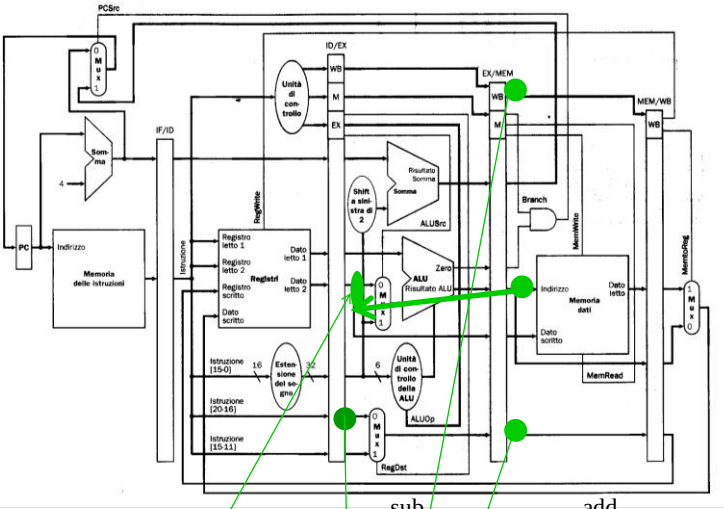
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

IF ((EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
(EX/MEM.RegisterWrite) then operando2 = EX/MEM.data;



sub add

Unità di propagazione

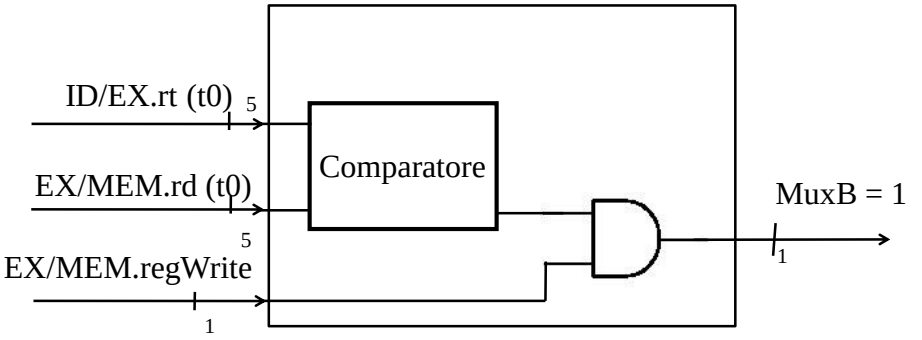


sub add

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0

Unità di propagazione

Unità di controllo della propagazione

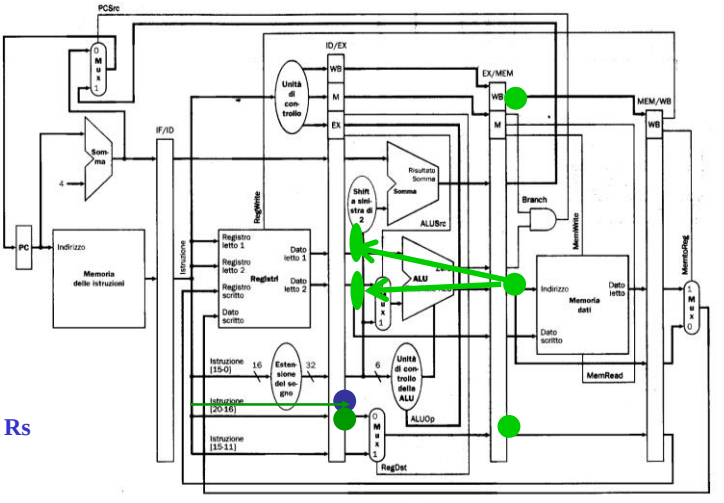


IF ((MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
(MEM/WB.RegisterWrite) Then MuxB = 1; # Operando2 = EX/MEM.data

Punti salienti per un hazard in MEM

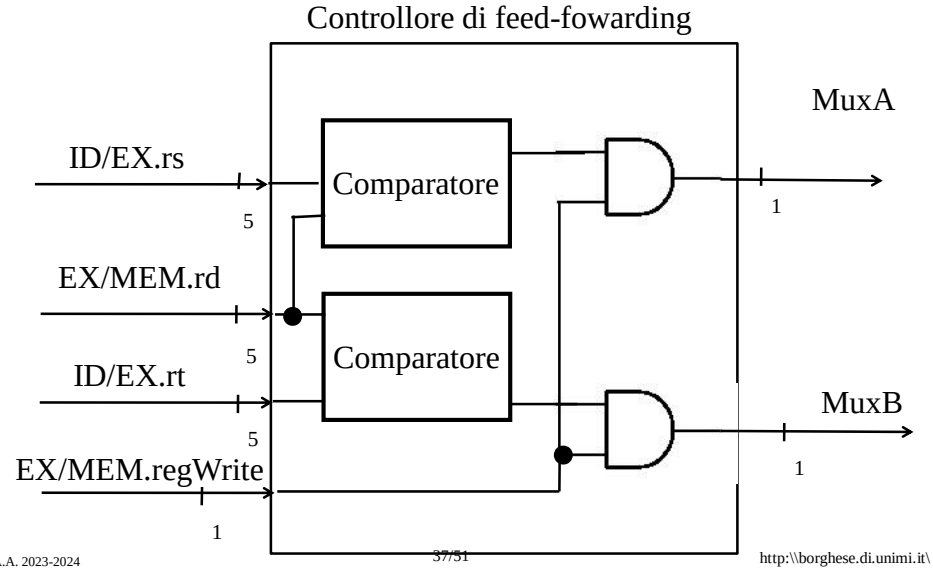
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t0, $t0

IF ((EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) &&
(EX/MEM.RegisterWrite) then operando1 = EX/MEM.data;
IF ((EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
(EX/MEM..RegisterWrite) then operando2 = EX/MEM.data;



Propago Rs

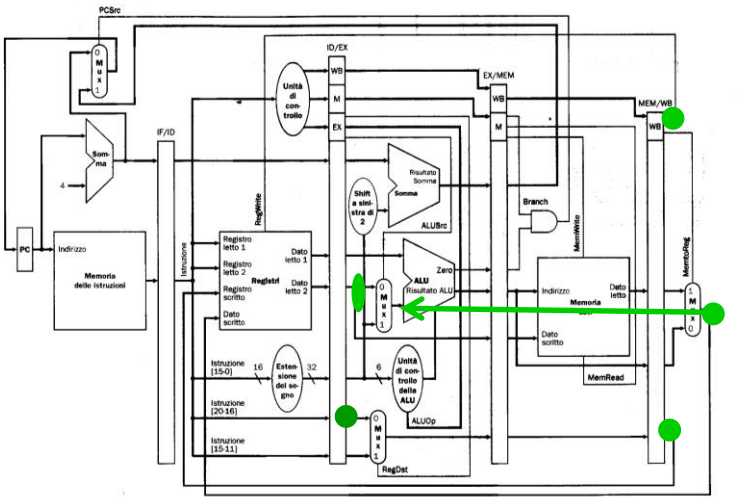
Unità di controllo della propagazione nello stadio MEM



Punti salienti per un hazard in WB

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t0, $t3
or $s1, $t2, $t0

IF ((MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
(MEM/WB.RegisterWrite)) then operando2 = MEM/WB.data;

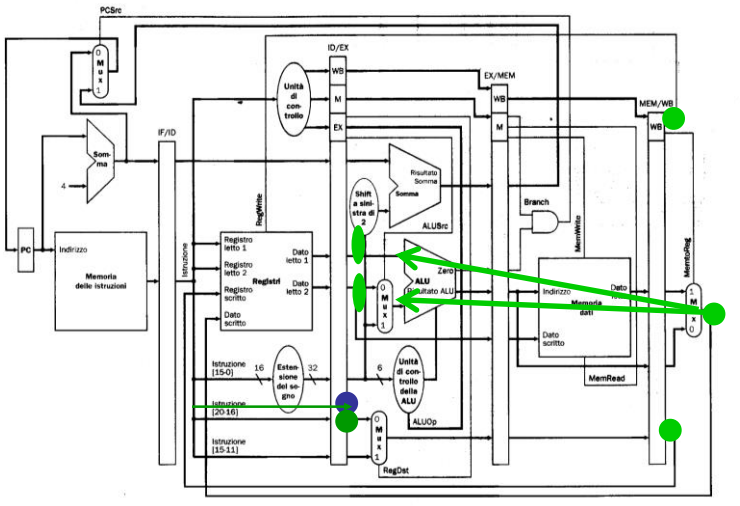


or sub add

Propagazione completa da WB

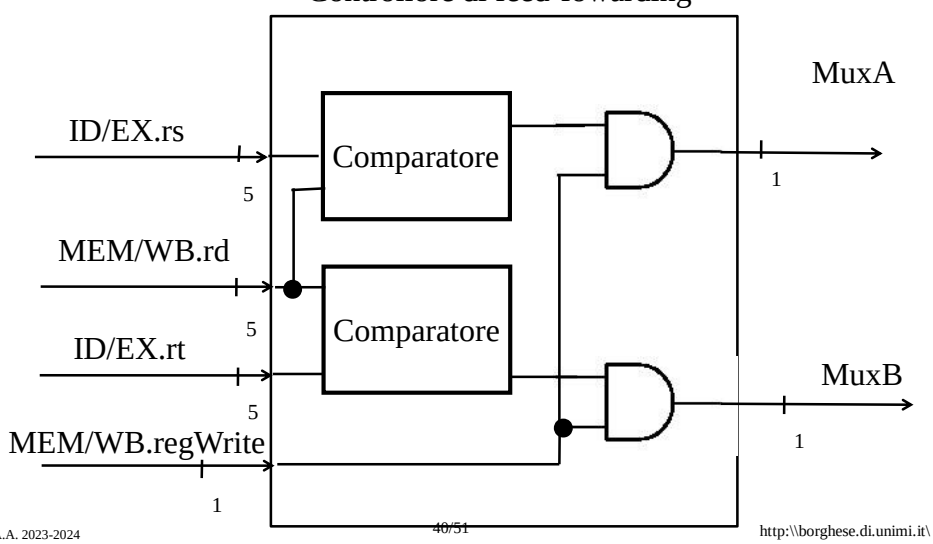
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t0, $t3
or $s1, $t0, $t0

IF ((MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) &&
(MEM/WB.RegisterWrite) then operando1 = MEM/WB.data;
IF ((MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
(MEM/WB.RegisterWrite)) then operando2 = MEM/WB.data;



Unità di controllo della propagazione nello stadio WB

Controllore di feed-fowarding



Relazione tra forwarding e contenuto del registro ID/EX

Nel normale funzionamento, il registro ID/EX contiene quanto letto dal Register File.

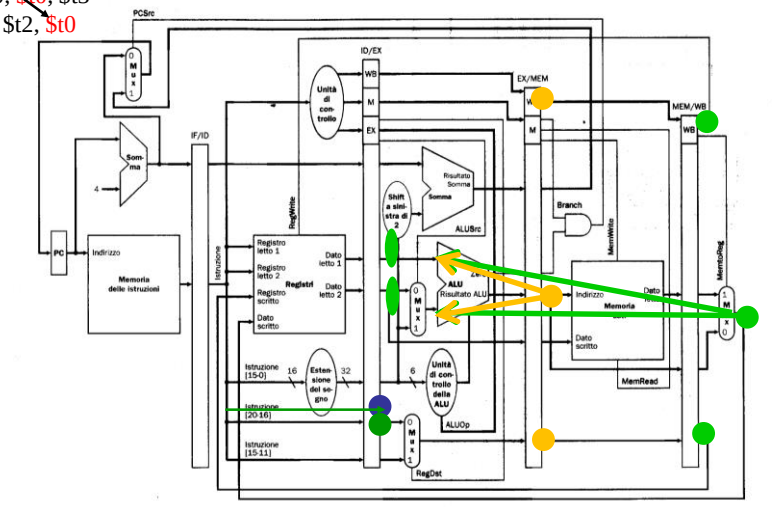
Quando abbiamo forwarding, quello che viene letto dal registro ID/EX nella **fase di esecuzione** viene sovrascritto da quanto letto dal registro EX/MEM o MEM/WB.

Nel registro EX/MEM è contenuto il risultato dell'operazione eseguita all'istante precedente.

Nel registro MEM/WB è contenuto il risultato dell'operazione eseguita 2 istanti precedenti.

Punti salienti per un hazard in MEM o WB

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t0, $t3
or $s1, $t2, $t0

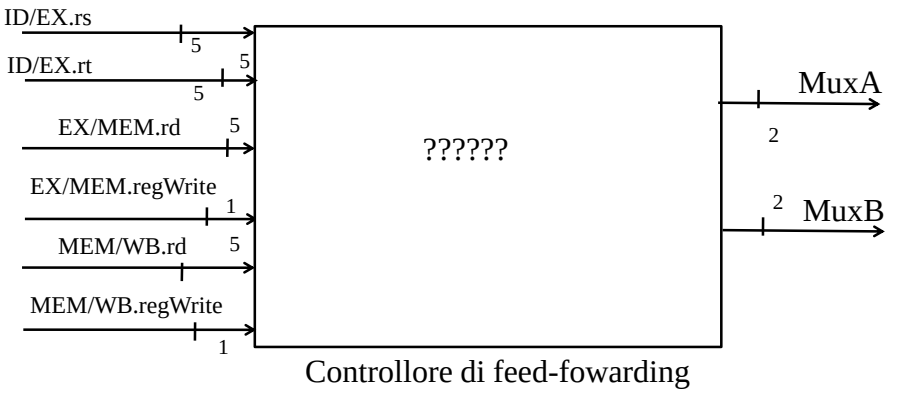


or sub add

Controllo Mux ingresso alla ALU

Controllo Multiplexer	Registro Sorgente	Funzione
PropagaA = 00	ID/EX	Il primo operando della ALU proviene dal Register File
PropagaA = 01	EX/MEM	Il primo operando della ALU è propagato dal risultato della ALU per l'istruzione precedente.
PropagaA = 10	MEM/WB	Il primo operando della ALU è propagato dalla memoria o da un'altra istruzione precedente.
PropagaB = 00	ID/EX	Il secondo operando della ALU proviene dal Register File
PropagaB = 01	EX/MEM	Il secondo operando della ALU è propagato dal risultato della ALU per l'istruzione precedente.
PropagaB = 10	MEM/WB	Il secondo operando della ALU è propagato dalla memoria o da un'altra istruzione precedente.

Unità di controllo della propagazione



Controllore di feed-fowarding

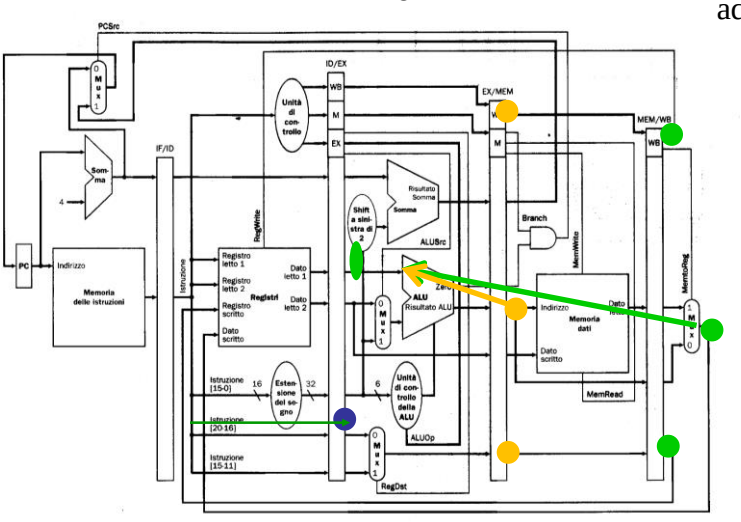
add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t0, $t3
or $s1, $t2, $t0

Hazard in MEM e WB

add $t0, $t1, $t2
sub $t0, $t0, $t3
or $s1, $t0, $t2

Operando 1 della `or` sarà = EX/MEM.data o a MEM/WB.data?

or sub add



Unità di controllo del forwarding

Deve controllare che la criticità sia effettiva (che l'istruzione precedente scriva il RegisterFile).

NB. L'unità di propagazione non ha conoscenza semantica: prende il contenuto di alcuni bus e lo elabora mediante una funzione logica, attivando opportunamento MuxA e MuxB. Non "sa" quello che sta facendo.

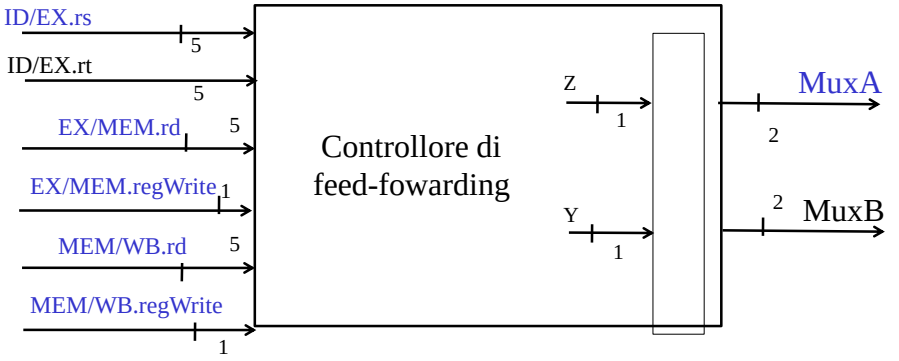
E' attiva nella fase di esecuzione (EX) ed implementa le seguenti funzioni:

Dato preso dalla fase MEM:
IF (ID/EX.RegistroRs == EX/MEM.RegistroRd) AND (EX/MEM.RegWrite)
ALUSrcA = <EX/MEM.Data>
IF (ID/EX.RegistroRt == EX/MEM.RegistroRd) AND (EX/MEM.RegWrite)
ALUSrcB = <EX/MEM.Data>

Dato preso dalla fase WB:
IF (ID/EX.RegistroRs == MEM/WB.RegistroRd) AND (MEM/WB.RegWrite)
ALUSrcA = <MEM/WB.Data>
IF (ID/EX.RegistroRt == MEM/WB.RegistroRd) AND (MEM/WB.RegWrite)
ALUSrcB = <MEM/WB.Data>

Cosa succede se è rilevata una criticità su RS (RT) sia con la fase di MEM che di WB?

Unità di controllo della propagazione

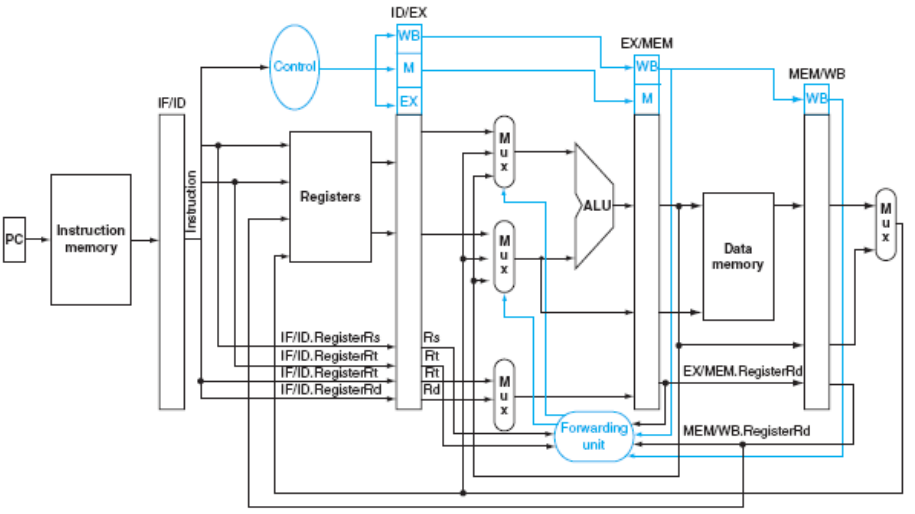


add $t0, $t1, $t2
sub $t0, $t0, $t3
or $s1, $t0, $t2

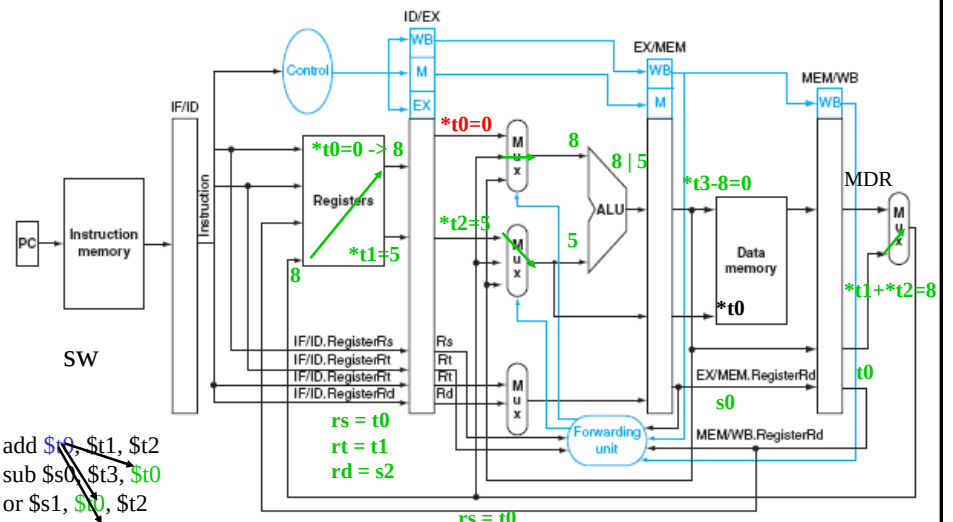
Tabella analoga per MuxB

Z ID/EX.rs = EX/MEM.rd & EX/MEM.write	Y ID/EX.rs = MEM/WB.rd & MEM/WB.write	MuxA
0	0	00 prendo da RF
0	1	10 prendo da MEM/WB
1	0	01 prendo da EX/MEM
1	1	01 prendo da MEM/WB

CPU con unità di propagazione



Esecuzione con forwarding

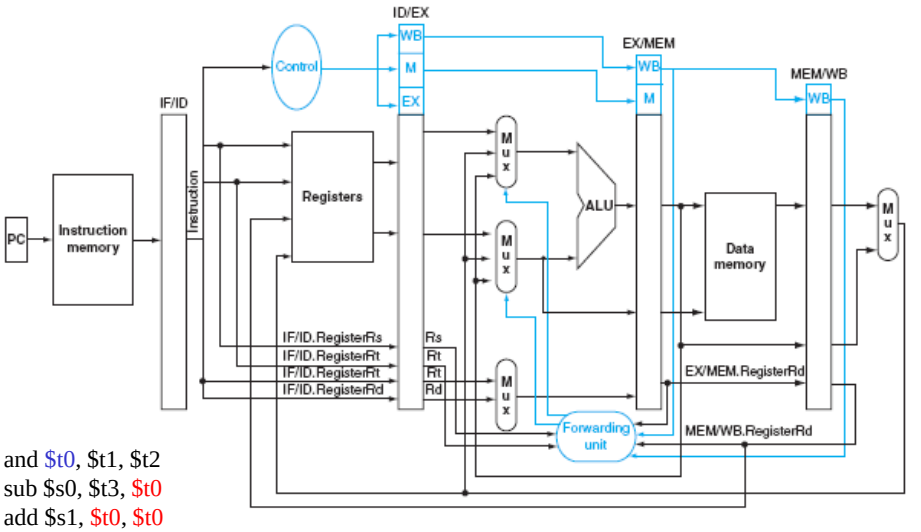


SW

add $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0
or $s1, $t0, $t2
and $s2, $t0, $t1
sw $s6, 100($t0)

and or sub add

Esercizio



and $t0, $t1, $t2
sub $s0, $t3, $t0
add $s1, $t0, $t0
and $s2, $t0, $t1
sw $s6, 100($t0)

Scrivere il contenuto di tutti i bus quando l'istruzione di add è in fase di EXE, MEM e WB. Ipotizzate *$t1 = 2, *t2 = 3, *t0 = 0

Sommario

Criticità in una pipeline

Hazard sui dati

Propagazione