



Hazard e forwarding

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
borgnese@dsi.unimi.it

Università degli Studi di Milano



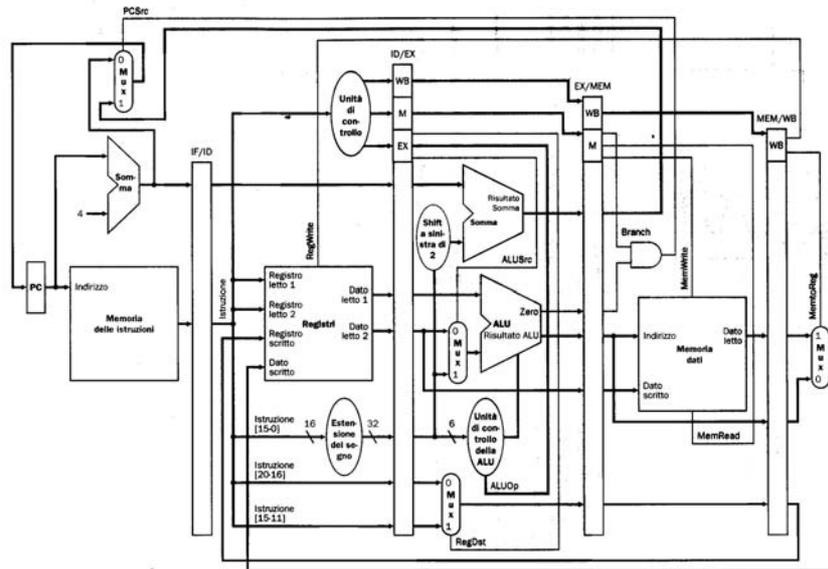
Sommario

Gli Hazard di una pipeline

Soluzione delle criticità sui dati



CPU con pipeline



Criticità (hazard)



Un'istruzione non può essere eseguita nel ciclo di clock immediatamente successivo a quella 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 memoria)..

Controllo:

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

Dati:

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

Esempio:

```
add $s0, $t1, $t1
add $s2, $s0, $t3
```



Esempio di Hazard sul controllo



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$1-\$3	MEM	WB s->\$2				
beq \$t2, \$s6, 24		IF	ID	EX Zero if (\$s2 == \$s5)	MEM	WB			
or \$t7, \$s6, \$s7			IF	ID	EX	MEM	WB		
add \$t4, \$s8, \$s8				IF	ID	EX	MEM	WB	
and \$s5, \$s6, \$s7					IF	ID	EX	MEM	
add \$t0, \$t1, \$t2						IF	ID	EX	

In caso di salto: dovrei avere disponibile all'istante in cui inizia l'esecuzione dell'istruzione or l'indirizzo dell'istruzione add e non eseguire la or, la add e la and.

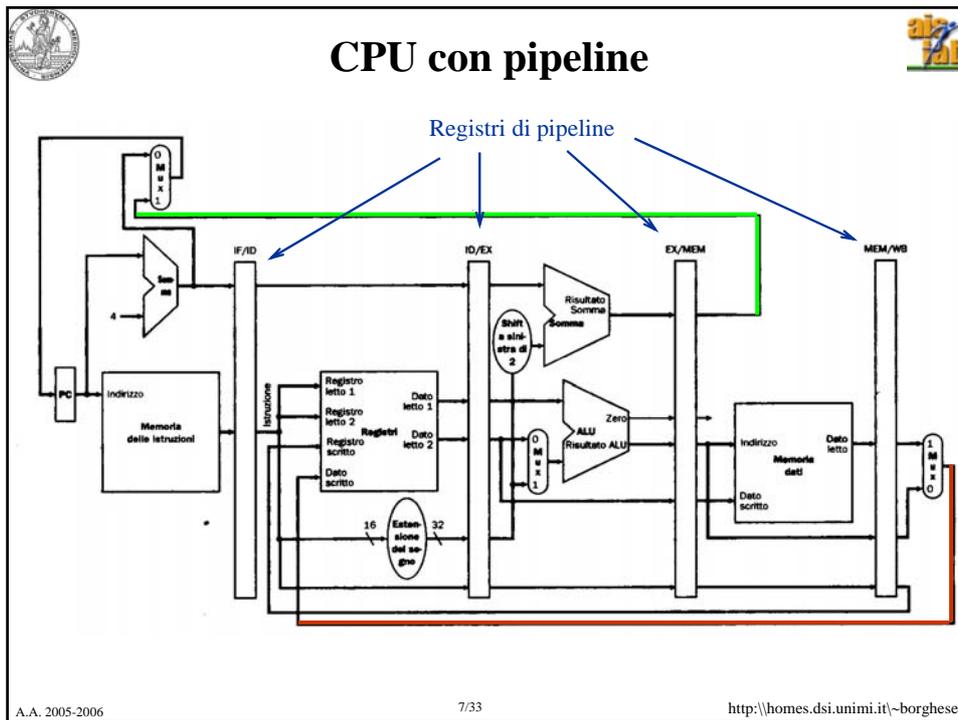
NB L'indirizzo scritto nel PC corretto deve essere disponibile prima dell'inizio della fase di fetch. Ho 3 istruzioni sbagliate in pipeline.



Esempio di Hazard sui dati



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$1-\$3	MEM	WB s->\$2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$2 and \$5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$6 or \$2	MEM	WB (s->\$t3)		
add \$t4, \$s2, \$s2				IF	ID	EX \$2 + \$2	MEM	WB s->\$t4	
sw \$t5, 100(\$s2)					IF	ID	EX \$2+100	MEM \$t5	WB



Soluzione delle criticità strutturali

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

Triplicazione delle ALU

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

A.A. 2005-2006 8/33 http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese



Criticità nei dati



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

Soluzione mediante due tecniche:

Riorganizzazione del codice (compilatore).

Propagazione (forwarding) o scavalcamento (bypassing).



Hazard nei dati: soluzione tramite compilatore



```
add $s0, $t1, $t1
nop
nop
nop
sub $s1, $s0, $s0
and $t2, $t0, $t1
or $t5, $t3, $t4
add $s2, $s7, $t7
sw $3, 100($t0)
```

```
add $s0, $t1, $t1
and $t2, $t0, $t1
or $t5, $t3, $t4
add $s2, $s7, $t7
sub $s2, $s0, $t3
sw $15, 100($s2)
```

Spreco di 3 cicli di clock (in modo che la fase IF dell'istruzione *sub \$s2, \$s0, \$t3* vada a coincidere con la fase di WB della *add \$s0, \$t1, \$t1*).

Situazione troppo frequente perché la soluzione sia accettabile.



Hazard sui dati



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1-\$s3	MEM	WB s->\$2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM (s->\$t3)			
add \$t4, \$s2, \$s2				IF	ID	EX \$s2 + \$2	MEM	WB s->\$t4	
sw \$t5, 100(\$s2)					IF	ID	EX \$s2+100	MEM \$t5	WB

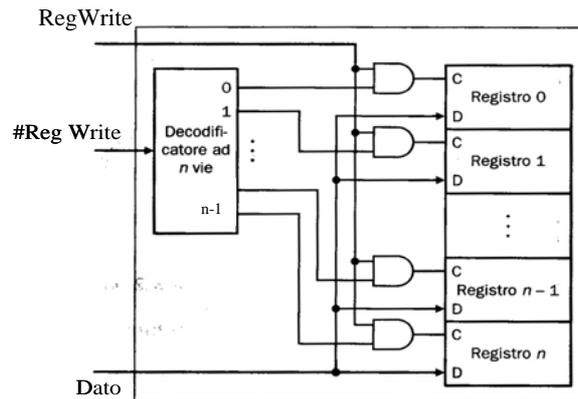
Con le frecce sono indicate le dipendenze, in blu gli hazard (tra sub e and, sub e add).

Il dato in \$s2 viene scritto nel Register File nella fase di WB della sub, è pronto al clock successivo. Non è ancora pronto quando viene effettuata la decodifica della and, della or e della add successiva.

ghese



E' una criticità il Register File?



No, a patto che utilizziamo Latch di tipo D



Hazard sui dati



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1-\$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		
add \$t4, \$s2, \$s2				IF	ID	EX \$s2 + \$s2	MEM	WB s->\$t4	
sw \$t5, 100(\$s2)					IF	ID	EX \$s2+100	MEM \$t5	WB

Con le frecce sono indicate le dipendenze, in blu gli hazard (tra sub, e and e or), dopo la modifica del RegisterFile: il dato è disponibile in lettura, già nella prima parte del clock. Il dato in \$s2 viene scritto nel Register File nella fase di WB della sub, è pronto al clock successivo. Non è ancora pronto quando viene effettuata la decodifica della and e della or successiva.

ghese



Soluzione architetturale della criticità sui dati



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

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

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

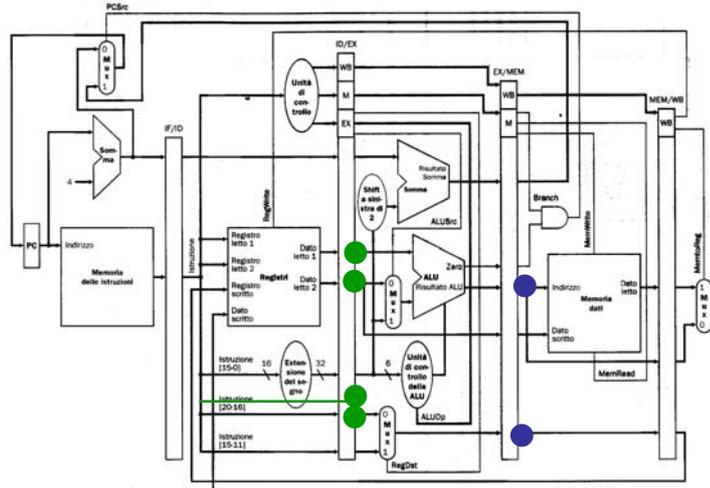


Identificazione delle criticità – EX/MEM



sub \$s2, \$s1, \$s3
and \$t2, \$s2, \$s5

1a. EX/MEM.RegistroRd = ID/EX.RegistroRs
1b. EX/MEM.RegistroRd = ID/EX.RegistroRt



A.A. 2005-2006

ghese



Hazard sui dati: rilevamento della criticità



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1- \$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		

Rilevo la criticità (dato non corretto) su **and** quando **and** inizia la fase di **EX**. In questo caso il dato corretto si trova all'inizio della fase **MEM** della **sub**.

Questo modo di rilevare la criticità consente di ottenere i datapath più brevi all'interno della CPU.

A.A. 2005-2006

18/33

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



Hazard sui dati: formalizzazione della criticità



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1- \$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		

IF ((EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) ||
 (EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt)) &&
 (EX/MEM.RegisterWrite)

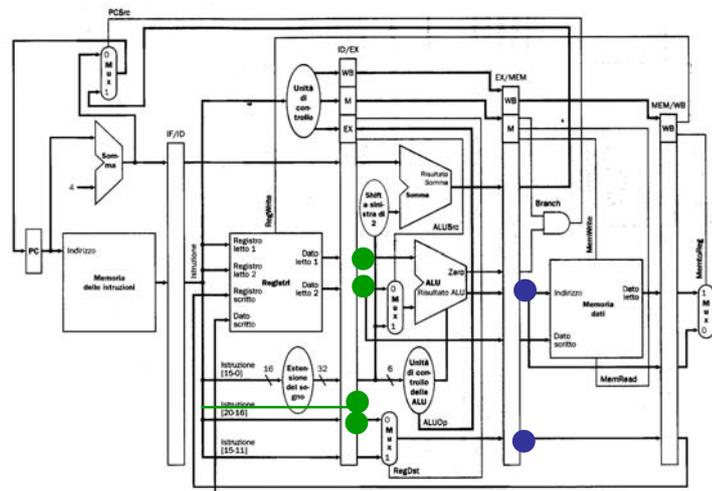


Abbiamo identificato il problema, dobbiamo ora risolverlo



sub \$s2, \$s1, \$s3
 and \$t2, \$s2, \$s5

IF ((EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) ||
 (EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt)) &&
 (EX/MEM.RegisterWrite)





Hazard sui dati: feed-forwarding

sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1- \$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		

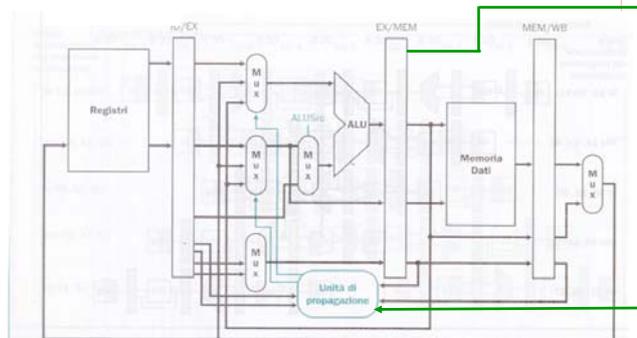
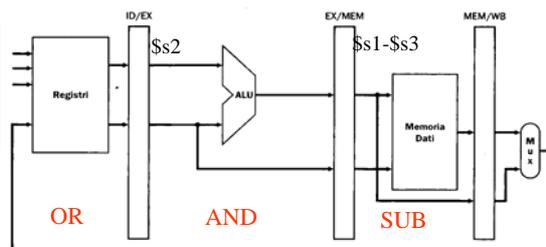
IF (EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) && (EX/MEM.RegisterWrite)
ALUSrcA = <EX/MEM.RegistroRd>

IF (EX/MEM.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) && (EX/MEM.RegisterWrite)
ALUSrcB = <EX/MEM.RegistroRd>



Hazard nei dati: forwarding

sub \$s2, \$s1, \$s3
and \$t2, \$s2, \$s5
or \$t3, \$s6, \$s2



"RegWrite = 1"

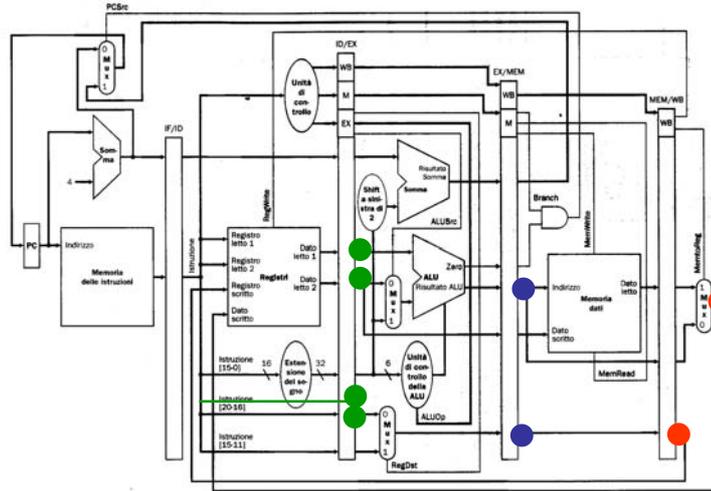


Identificazione delle criticità – MEM/WB



sw \$s1, 100(\$t1)
 sub \$s2, \$s1, \$s3
 and \$t2, \$s2, \$s5
 or \$t3, \$s6, \$s2

2a. MEM/WB.RegistroRd = ID/EX.RegistroRs
 2b. MEM/WB.RegistroRd = ID/EX.RegistroRt



A.A. 2005-2006

ghese



Hazard sui dati: rilevamento della criticità



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX	MEM	WB				
			\$s1-\$s3		s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5	IF	ID	EX	MEM	WB				
			\$s2 and \$s5		s->\$t2				
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX	MEM	WB		
					\$s6 or \$s2		(s->\$t3)		

Rilevo la criticità (dato non corretto) su **and** quando **and** inizia la fase di **EX**. In questo caso il dato corretto si trova all'inizio della fase **MEM** della **sub**.

➔ Rilevo la criticità (dato non corretto) su **or** quando **or** inizia la fase di **EX**. In questo caso il dato corretto si trova all'inizio della fase **WB** della **sub**.

Questo modo di rilevare la criticità consente di ottenere i datapath più brevi all'interno della CPU.

A.A. 2005-2006

24/33

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



Hazard sui dati: formalizzazione della criticità



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1- \$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		

IF (MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) ||
 (MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) &&
 (MEM/WB.RegisterWrite)



Hazard sui dati: feed-forwarding



sub \$s2, \$s1, \$s3	IF	ID	EX \$s1- \$s3	MEM	WB s->\$s2				
and \$t2, \$s2, \$s5		IF	ID	EX \$s2 and \$s5	MEM	WB s->\$t2			
or \$t3, \$s6, \$s2			IF	ID	EX \$s6 or \$s2	MEM	WB (s->\$t3)		

IF (MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRs) && (MEM/WB.RegisterWrite)
 ALUSrcA = <MEM/WB.RegistroRd>

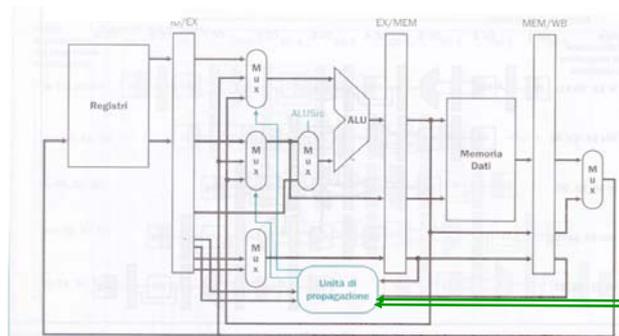
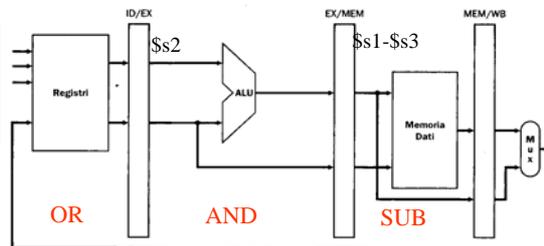
IF (MEM/WB.RegistroRd == ID/EX.RegistroRt) && (MEM/WB.RegisterWrite)
 ALUSrcB = <MEM/WB.RegistroRd>



Hazard nei dati: forwarding



```
sub $s2, $s1, $s3  
and $t2, $s2, $s5  
or $t3, $s6, $s2
```



EX/MEM.RegWrite
MEM/WB.RegWrite



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.



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 del forwarding



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

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)
ID/EX.RegistroRs = EX/MEM.RegistroRd

IF (ID/EX.RegistroRt == EX/MEM.RegistroRd) AND (EX/MEM.RegWrite)
ID/EX.RegistroRt = EX/MEM.RegistroRd

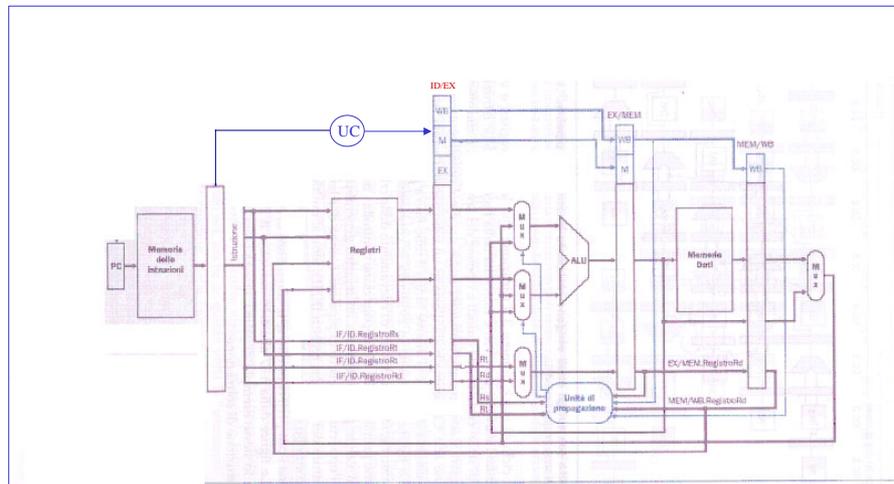
Dato preso dalla fase WB:

IF (ID/EX.RegistroRs == MEM/WB.RegistroRd) AND (MEM/WB.RegWrite)
ID/EX.RegistroRs = MEM/WB.RegistroRd

IF (ID/EX.RegistroRt == MEM/WB.RegistroRd) AND (MEM/WB.RegWrite)
ID/EX.RegistroRt = MEM/WB.RegistroRd



CPU con unità di propagazione



Hazard nei dati: soluzioni



- Buona scrittura del codice (il programmatore deve conoscere la macchina per scrivere un buon codice!).
- Compilatore efficiente (che riordini il codice).
- Architettura che renda disponibile i dati appena pronti alla fase di esecuzione.
- Accettare uno stallo (non sempre si può evitare).



Sommario



Gli Hazard di una pipeline

Soluzione delle criticità sui dati