

452 *Le strutture ad arco*

Per carico proporzionale si ha:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.98346038123153
 MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.98346038123154

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
2	14.3	INTR	CONGLOMERATO
11	143	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	16428.7983501309	-17850
2	15096	-11576.0877264037
3	12465.6563829298	-8860.04565096814
4	9570.71873537982	-8289.01283083781
5	7178.07215409327	-8769.74648426635
6	5829.32449034282	-9569.4108848598
7	5840.47517664755	-10315.2461882945
8	7301.3831771412	-10994.0363826849
9	10074.9427019565	-11951.2850029685
10	13796.7142484366	-13890.8461721165
11	17850	-17850.0000000001

TEMPO DI ESECUZIONE = 4.169921875 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:22:03

mentre per carico non proporzionale il coefficiente di rottura è notevolmente più alto:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 21.2552379923477
 MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 21.2552379923477

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
3	28.6	EXTR	FERRO
8	100.1	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	-4936.54	-13892.1139994697

2	6069.27860338389	-935.386672660179
3	9454.33135185074	3582.517599999999
4	8060.74743286344	2646.72755913563
5	4284.18978947771	-1170.19118895077
6	148.642205840901	-5783.02325777658
7	-2705.60707747054	-9581.88709601749
8	-3030.20035095791	-11423.99999999999
9	30.2482333961225	-10632.6367832981
10	6945.38066745064	-7004.35778205662
11	17850	-859.913768084333

TEMPO DI ESECUZIONE = 3.240234375 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:22:16

8.6.2. Le forze concentrate

Si passi ora alle forze concentrate, iniziando con due forze verticali di 100 t ciascuna, agenti a cavallo della mezzeria. Per carico proporzionale si ha:

MULTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.89290709982216

MULTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.89290709982219

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
6	71.5	INTR	CONGLOMERATO
11	143	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	17850.0000000002	-17849.9999999998
2	13632.287161047	-14290.1271083519
3	10424.8821403023	-11964.3023395704
4	8866.2801525655	-9854.62330449504
5	9394.14305996521	-7215.61071956905
6	10200	-5665.7661876257
7	9394.14305996516	-7215.61071956911
8	8866.28015256551	-9854.62330449503
9	10424.8821403022	-11964.3023395705
10	13632.2871610468	-14290.1271083521
11	17850	-17850.0000000001

TEMPO DI ESECUZIONE = 4.7802734375 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:22:36

mentre anche in questo caso il carico di collasso per aumento non proporzionale è molto più elevato:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 10.1660645850518
 MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 10.1660645850518

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
3	28.6	EXTR	CONGLOMERATO
6	71.5	INTR	CONGLOMERATO
9	114.4	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	17850	-2441.05234122297
2	6547.0622937192	-9903.83810690942
3	699.330978223711	-12954.0000000001
4	479.784886587899	-11191.944853569
5	6040.99415090737	-4361.2627997121
6	10200	428.920576128756
7	6040.99415090736	-4361.26279971211
8	479.784886587901	-11191.944853569
9	699.330978223738	-12954
10	6547.06229371923	-9903.83810690939
11	17850	-2441.05234122303

TEMPO DI ESECUZIONE = 2.9697265625 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:22:50

Lo stesso caso, ma in assenza di peso proprio, porta ai seguenti risultati:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 11.227896758994
 MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 11.227896758994

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
4	42.9	INTR	FERRO
6	71.5	EXTR	FERRO
8	100.1	INTR	FERRO
11	143	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	14722.149819111	4936.54000000002

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 455

2	2487.37784347987	-5881.84975900862
3	-3453.37257011381	-10735.3840877519
4	-3159.38559999997	-9564.7788078999
5	3370.99243723316	-2371.68760286434
6	8104.87870357881	2820.88000000001
7	3370.99243723314	-2371.68760286436
8	-3159.38559999997	-9564.7788078999
9	-3453.37257011382	-10735.3840877519
10	2487.37784347988	-5881.84975900861
11	14722.149819111	4936.53999999999

TEMPO DI ESECUZIONE = 3.8994140625 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:23:09

Le cerniere sono cinque, e tutte si formano per crisi nel ferro. Se le due forze sono invertite, e sempre in assenza di peso proprio, risulta:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 3.79117858696054

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 3.79571161044252

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
3	28.6	EXTR	FERRO
6	71.5	INTR	FERRO
9	114.4	EXTR	FERRO
11	143	INTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	-4936.53999999999	-1640.07440474805
2	-844.235395135372	1974.82578299086
3	1130.17980302142	3582.51760000001
4	1006.54343735156	3163.16320339823
5	-1215.68278715725	717.300888197805
6	-2820.87999999999	-1042.82061317345
7	-1215.68278715725	717.300888197807
8	1006.54343735155	3163.16320339822
9	1130.17980302141	3582.5176
10	-844.235395135387	1974.82578299085
11	-4936.54	-1640.07440474805

TEMPO DI ESECUZIONE = 2.640625 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:24:29

In presenza di due forze verticali $\mp 100 t$ agenti a cavallo della mezzeria, si ha:

MULTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 6.79225523092838

MULTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 6.79225523092838

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	FERRO
5	57.2	INTR	FERRO
7	85.8	EXTR	FERRO
11	143	INTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	4637.48534700676	4936.54
2	2773.93627581409	3009.05297358967
3	899.550465337234	1065.10516977933
4	-994.05978303442	-886.915712820413
5	-2905.5064	-2848.39774351043
6	23.5142506963989	35.2804216809673
7	2938.68957158096	2905.5064
8	985.724657964892	903.650115907874
9	-977.030722385711	-1115.71321813391
10	-2948.12933550845	-3154.03083608777
11	-4936.54	-5202.333919357

TEMPO DI ESECUZIONE = 2.259765625 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:24:41

Il caso di due forze orizzontali di 100 tonnellate applicate a cavallo della mezzeria si traduce in una crisi dovuta allo snervamento del ferro. I risultati sono:

MULTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 7.17606828560156

MULTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 7.17606828560156

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
4	42.9	EXTR	FERRO
7	85.8	INTR	FERRO
11	143	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	-4936.54	-2702.85387479495
2	-1232.58185095907	686.208418786775

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 457

3	960.765723926135	2646.18363016596
4	1661.18888399823	3159.3856
5	867.724271150587	2226.77768639552
6	-1117.79477402442	-1285.89737236963
7	-2905.5064	-4606.38182217334
8	-3105.8015310369	-4962.16513310594
9	-1417.50590473702	-3486.84548869534
10	2157.57183872567	-178.61424876754
11	7645.42028602858	4936.54

TEMPO DI ESECUZIONE = 3.6796875 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:24:53

8.6.3. I carichi sismici

Si consideri il caso di un carico accidentale verticale pari ad un ventesimo del peso proprio, e diretto verso l'alto, mentre il carico accidentale orizzontale è un decimo del peso proprio. Per carico non proporzionale si ha:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 6.56442706414949

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 6.56442706414949

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
4	42.9	EXTR	FERRO
8	100.1	INTR	FERRO
11	143	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	-4936.54	-8638.6584541584
2	3423.52262512046	159.546142604334
3	6564.26716417895	3559.55573029769
4	6151.39050419308	3159.38559999999
5	3648.67763800286	439.995149591978
6	413.256267929147	-3260.27666157194
7	-2270.5961862976	-6709.82826226262
8	-3159.38560000001	-8746.17239858392
9	-1018.50494208402	-8238.14227711288
10	5411.22902876092	-4049.66481036963
11	17506.9652055737	4936.53999999999

DIV. MOM. ESTR. DA PESO PROPRIO MOM. INTR. DA PESO PROPRIO

1	5795.79345266798	-5795.79345266798
2	4967.26313441602	-4047.05813441598
3	4031.15932971858	-3158.66866305193
4	3211.33061334721	-2781.90161334719
5	2659.13569851578	-2659.13569851577
6	2465.04468390806	-2635.45301724137
7	2659.13569851578	-2659.13569851577
8	3211.33061334721	-2781.90161334719
9	4031.15932971859	-3158.66866305192
10	4967.26313441602	-4047.05813441598
11	5795.79345266797	-5795.793452668

TEMPO DI ESECUZIONE = 3.3505859375 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:25:59

Sono forniti in questo caso, in cui il carico aumenta con legge non proporzionale, anche i momenti estremi da peso proprio.

Per carico proporzionale invece si ha:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.85773526488901

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.85773526488904

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
3	28.6	INTR	CONGLOMERATO
8	100.1	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	11589.6570089019	-17850
2	13622.5610569041	-9418.79307679003
3	12954	-5581.37575050571
4	10853.2790226573	-4799.24223287439
5	8324.19057729832	-5803.51739580232
6	6176.75845948539	-7636.36221451075
7	5043.22329869926	-9636.62062626813
8	5392.56165999724	-11424.0000000001
9	7543.70525350663	-12881.9517137366
10	11678.7853328144	-14140.5769209528
11	17850	-15553.1552235563

TEMPO DI ESECUZIONE = 5.7607421875 SEC.

RUN DEL 10-31-1994 ORE 02:26:17

8.7. L'arco in conci lapidei

L'arco non armato, in particolare quello costituito da conci lapidei o laterizi, si può trattare come nei paragrafi precedenti, ponendo $\sigma_{f0} = 0$. Se si vuole rispettare l'ipotesi di Heyman, e cioè quella di resistenza infinitamente grande della pietra, basterà porre $\sigma_{c0} = \infty$.

La posizione $\sigma_{f0} = 0$ è rigorosa; dal dominio della 8.12 si passa a quello della Figura 8.24. L'ipotesi $\sigma_{c0} = \infty$ ($OC = -\infty$) consente poi di sostituire il rombo con la bilatera AOB . In tale ipotesi non interessa che la sezione dell'arco non è più cellulare, ma piena; ed infatti nella cerniera plastica, che in questo caso si chiama *cerniera di apertura*, il centro di rotazione relativa è in uno dei due bordi, e quindi è comunque:

$$M = \pm N \frac{b}{2} \quad (8.114)$$

Si può effettuare una verifica della attendibilità dell'ipotesi di Heyman assimilando la sezione piena ad una sezione cellulare, con solette — per esempio — di spessore $s = b/10$, e σ_{c0} pari a σ_{cr}/k , dove σ_{cr} è la compressione cubica di rottura, e k un coefficiente prudenziale, per esempio $k = 1.2$.

8.8. Alcuni esempi

Si consideri un arco in muratura delle stesse dimensioni dell'arco dell'Argen, in cui si pone:

$$\sigma_{f0} = 0; \quad \sigma_{c0} = 200 \text{ Kgcm}^{-2}; \quad s = 0.1 b; \quad A_f = 0 \quad (8.115)$$

Il carico sia quello di tipo sismico, non proporzionale. Per definire i carichi equivalenti alle stese di tipo sismico si può calcolare le forze equivalenti al peso proprio, e poi dividerle per venti e per dieci, rispettivamente, per giungere alle forze equivalenti ai carichi accidentali. Alternativamente, si può modificare la subroutine "Geometria" del programma AR1, nella parte dedicata ai carichi. Più precisamente, le righe:

```

REM -----
REM Riempimento degli array dei carichi, se descritti da funzioni
REM -----
IF CARICHI$ = "FUNC" THEN
  FOR I = 1 TO T
    Z1 = LUCE / T * (I - 1)
  
```

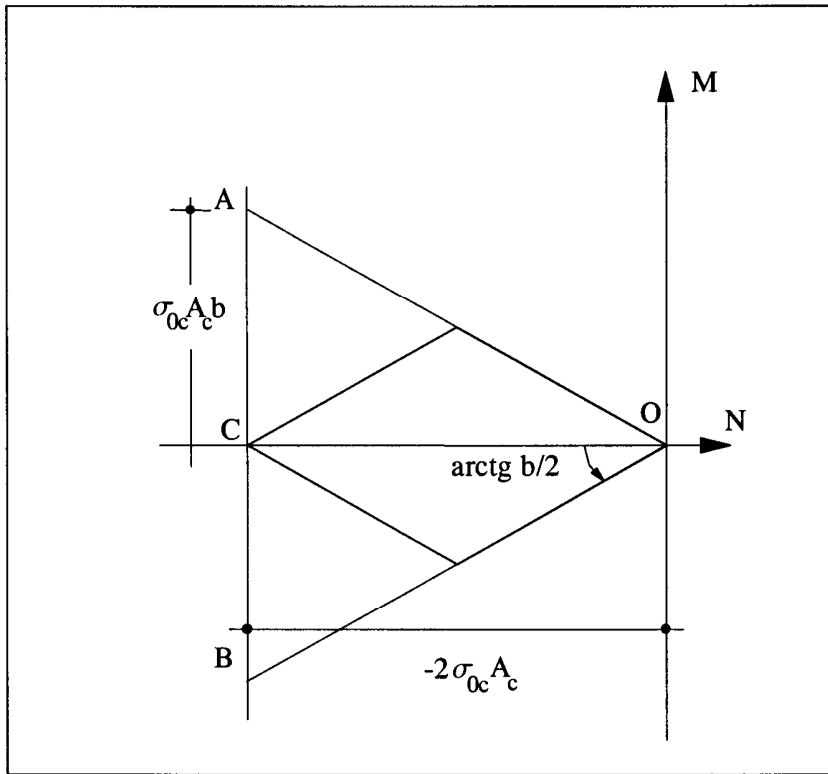



Figura 8.24- Il dominio limite secondo Heyman

```

Z2 = LUCE / T * I
FVERT(I) = (FNF(Z1) + FNF(Z2)) / 2 * LTRAT
FACCV(I) = (FNP(Z1) + FNP(Z2)) / 2 * LTRAT
FACCO(I) = (FNT(Z1) + FNT(Z2)) / 2 * LTRAT
NEXT I
END IF
divengono:
REM _____
REM Riempimento degli array dei carichi, se descritti da funzioni
REM _____
IF CARICHI$ = "FUNC" THEN
  FOR I = 1 TO T
    Z1 = LUCE / T * (I - 1)

```

```

Z2 = LUCE / T * I
FVERT(I) = (FNF(Z1) + FNF(Z2)) / 2 * LTRAT
FACCV(I) = -FVERT(I)/20
FACCO(I) = FVERT(I)/10
NEXT I
END IF

```

A questo punto il file di ingresso dati si presenta come:

```

"ARCO DI PROVA",VIDEOFILES,VIDEOFILES,"ES8-16.ING","ES8-16.USC"
143,10,8.5,0,2000,3.5,2,3.5,.35,.2,.35
0,0,0,0.0001
2,5,7,9,EXTR,INTR,INTR,EXTR
FUNC,FUNC,"NON PROPORZIONALE"
29,0,33,28,33,0,0,0,0,0

```

e gli ultimi sei zeri hanno solo valore formale. Il programma modificato, chiamato AR1SISM, fornisce:

```

MULTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 3.3432068043174
MULTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 3.34320680431742

```

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
4	42.9	EXTR	FERRO
8	100.1	INTR	FERRO
11	143	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	2.37605490838178D-11	-7594.71198942972
2	3874.12725740667	-2229.23682212982
3	5046.91431167625	-25.95947559852
4	4476.62798924228	-1.91051618969595D-11
5	2983.00631557662	-1270.67320994297
6	1301.56928936089	-3080.30690539062
7	101.080111330836	-4776.21054724467
8	-1.80779835545764D-11	-5791.63751980788
9	1582.62948982856	-5626.43387569246
10	5415.91782972844	-3828.3551810639
11	12091.8890206826	-1.17097442853265D-11

DIV. MOM. ESTR. DA PESO PROPRIO MOM. INTR. DA PESO PROPRIO

1	5795.79345266798	-5795.79345266798
2	4967.26313441602	-4047.05813441598
3	4031.15932971858	-3158.66866305193
4	3211.33061334721	-2781.90161334719
5	2659.13569851578	-2659.13569851577
6	2465.04468390806	-2635.45301724137
7	2659.13569851578	-2659.13569851577
8	3211.33061334721	-2781.90161334719
9	4031.15932971859	-3158.66866305192
10	4967.26313441602	-4047.05813441598
11	5795.79345266797	-5795.793452668

DIV. MOMENTI LIMITE FERRO MOMENTI LIMITE CONGLOMEARTO

1	0	20825
2	0	14894.72
3	0	10967.72
4	0	8529.92
5	0	7214.12
6	0	6800
7	0	7214.12
8	0	8529.92
9	0	10967.72
10	0	14894.72
11	0	20825

TEMPO DI ESECUZIONE = 8.2890625 SEC.

RUN DEL 11-01-1994 ORE 07:52:01

La crisi si ha nel ferro, e cioè con cerniere di apertura alla Heyman; naturalmente il valore del coefficiente di sicurezza non varia operando strettamente alla Heyman, e cioè ponendo $\sigma_{c0} = \infty$.

Per carico proporzionale si deve porre un valore molto basso, ma positivo, delle aree di ferro o della tensione limite nell'acciaio, al solo scopo di evitare una divisione per zero. Ponendo ad esempio un'area di ferro pari a 10^{-10} si ha, tramite il programma AR1SISM:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.59607420783039

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.59654521482213

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO

5	57.2	INTR	CONGLOMERATO
7	85.8	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

e questa volta le cerniere si hanno tutte per crisi del conglomerato.

Operando strettamente alla Heyman il coefficiente di rottura per aumento proporzionale del carico è privo di senso. In questo caso infatti può solo dirsi se sotto i carichi $g + a$ la struttura è o non è in equilibrio. Se lo è, lo resta per qualsiasi carico $k(g + a)$, e quindi il coefficiente di rottura è infinitamente grande. Se non lo è, il coefficiente di rottura è zero.

Ponendo $\sigma_{c0} = 10^{10}$ si ottiene, col programma AR1SISM:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 129819415.902726
MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 129819415.902728

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
4	42.9	INTR	CONGLOMERATO
7	85.8	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

e quindi un coefficiente di rottura dello stesso ordine di σ_{c0} . Per $\sigma_{c0} \rightarrow \infty$ si ha che anche il coefficiente di rottura tende ad infinito. Ciò significa che il carico sismico è compatibile con l'equilibrio, e questo ci si attendeva, poichè si ha rottura alla Heyman, per carico non proporzionale, con $s_r > 1$.

Se si considera invece un carico non compatibile con l'equilibrio:

$$p_1 = 10 \text{ tm}^{-1} \quad p_2 = 0 \text{ tm}^{-1} \quad p_3 = 10 \text{ tm}^{-1} \quad (8.116)$$

$$t_1 = 20 \text{ tm}^{-1} \quad t_2 = 20 \text{ tm}^{-1} \quad t_3 = 20 \text{ tm}^{-1} \quad (8.117)$$

il programma AR1 fornisce un moltiplicatore di rottura bassissimo:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.39048769706845D-13
MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.39048769706847D-13

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
3	28.6	EXTR	FERRO
8	100.1	INTR	FERRO
11	143	EXTR	FERRO

Si considera ora un arco di 50 metri di luce, 10 metri di freccia, altezza variabile da 1.28 metri agli estremi ad 1 metro al centro. Si è posto inoltre $\sigma_f = 0$, $A_f = 0$ e $\sigma_{c0} = 2000 \text{ Kgcm}^{-2}$. Il file di ingresso dati si presenta come:

```

"ARCO DI PROVA",VIDEOFILES,VIDEOFILES,"ES8-20.ING","ES8-20.USC"
50,10,1,0,2000,1.28,1,1.28,.128,.1,.128,0,0,0,0.0001
1,4,7,11
INTR,EXTR,INTR,EXTR
FUNC,FUNC,"NON PROPORZIONALE"
10,0
7,3,7,-.35,-.15,-.35,7,.3,.7
    
```

e quindi il carico, di tipo sismico, è definito da:

$$f_1 = 7tm^{-1} \quad f_2 = 3tm^{-1} \quad f_3 = 7tm^{-1} \quad (8.118)$$

$$p_1 = -.35tm^{-1} \quad p_2 = -.15tm^{-1} \quad p_3 = -.35tm^{-1} \quad (8.119)$$

$$t_1 = .7tm^{-1} \quad t_2 = .3tm^{-1} \quad t_3 = .7tm^{-1} \quad (8.120)$$

I risultati sono:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 3.22260293668422
 MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 3.22260293668427

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
3	10	EXTR	FERRO
7	30	INTR	FERRO
11	50	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	1.76497705339784D-13	-136.212474142354
2	92.8923728003058	-23.7580668408032
3	104.964494676373	4.05019767724113D-13
4	77.3012488775399	-22.7470456131883
5	38.9214815153976	-61.0636924080107
6	9.29235975681846	-94.4845586323722
7	4.19497769854615D-13	-111.385074823321
8	16.4321987937169	-107.364269319133
9	59.4411639981929	-83.6075540130247

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 465

10	127.003652723611	-45.2469168844914
11	216.159994737964	-4.20427581637739D-14

DIV. MOM. ESTR. DA PESO PROPRIO MOM. INTR. DA PESO PROPRIO

1	101.572070994385	-101.572070994385
2	127.80726229791	-37.8072622979095
3	113.291230998298	-27.9578976649649
4	84.4129488247993	-42.4129488247993
5	59.6840041937874	-59.6840041937873
6	50.2083333333334	-66.8749999999999
7	59.6840041937874	-59.6840041937873
8	84.4129488247993	-42.4129488247993
9	113.291230998298	-27.9578976649649
10	127.80726229791	-37.8072622979095
11	101.572070994385	-101.572070994385

DIV. MOMENTI LIMITE FERRO MOMENTI LIMITE CONGLOMEARTO

1	0	327.68
2	0	278.102528
3	0	242.352128
4	0	218.321408
5	0	204.505088
6	0	200
7	0	204.505088
8	0	218.321408
9	0	242.352128
10	0	278.102528
11	0	327.68

TEMPO DI ESECUZIONE = 10.44140625 SEC.

RUN DEL 11-01-1994 ORE 13:47:20

Le cerniere quindi si hanno tutte per snervamento del ferro. Dimezzando invece la σ_{c0} si ha:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 2.81143742231055

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 2.81143742231061

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
3	10	EXTR	FERRO

7	30	EXTR	CONGLOMERATO
11	50	INTR	CONGLOMERATO

e la crisi avviene per snervamento del ferro nelle prime due cerniere, per rottura del conglomerato nelle altre due cerniere.

Si prenda ora in esame il ponte di Pont Saint Martin, in Val d'Aosta, di epoca romana tarda-repubblicana. Per esso si ha una luce di 31.4 metri, una freccia di 11.4 metri, una larghezza di 6 metri, un'altezza costante di 90 centimetri, ed un peso proprio variabile da 7 tm^{-1} alle imposte a 2.5 tm^{-1} in chiave. Con un carico di tipo sismico, e ponendo $\sigma_{c0} = 20 \text{ Kg cm}^{-2}$ si ha il seguente file di ingresso dei dati:

"ARCO DI PONT SAIN MARTIN", VIDEOFILES, VIDEOFILES

"ES8-22.ING", "ES8-22.USC"

31.4,10,6,0,200,.9,.9,.9,.09,.09,.09,0,0,0,0.0001

1,4,7,11,INTR,EXTR,INTR,EXTR

FUNC,FUNC,"NON PROPORZIONALE"

11.4,0,7,2.5,7,-.35,-.125,-.35,.7,.25,.7

ed i risultati:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.44733835747056

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.44733835747058

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	INTR	FERRO
3	6.28	EXTR	FERRO
7	18.84	INTR	FERRO
11	31.4	EXTR	FERRO

DIV.	MOMENTI INTRADOSSALI	MOMENTI ESTRADOSSALI
1	2.58994214963337D-14	-54.6839029513673
2	33.4679570308946	-9.7435912229097
3	35.5692175194119	-1.32244909467616D-13
4	23.5928970519433	-8.01429141356802
5	9.41206663104349	-21.0978014451096
6	.349442383356619	-30.9840520292487
7	-2.37263333979776D-13	-33.4576878887511
8	9.12031203494672	-28.050136227545
9	26.0914825815439	-17.3088638018688
10	47.2291263222835	-5.91367836467985
11	67.3003174685166	1.05040975917348D-13

DIV. MOM. ESTR. DA PESO PROPRIO MOM. INTR. DA PESO PROPRIO

1	32.4861885529841	-32.4861885529837
2	45.515930310295	-5.58455031029438
3	39.7303998615773	-1.86953586157691
4	27.2996444193309	-8.6650004193306
5	16.6247885590364	-16.6247885590361
6	12.5515302631581	-19.9462302631577
7	16.6247885590363	-16.6247885590362
8	27.2996444193308	-8.66500041933077
9	39.7303998615772	-1.86953586157707
10	45.5159303102948	-5.58455031029464
11	32.486188552984	-32.4861885529838

DIV. MOMENTI LIMITE FERRO MOMENTI LIMITE CONGLOMEARTO

1	0	97.2
2	0	97.2
3	0	97.2
4	0	97.2
5	0	97.2
6	0	97.2
7	0	97.2
8	0	97.2
9	0	97.2
10	0	97.2
11	0	97.2

TEMPO DI ESECUZIONE = 5.4921875 SEC.

RUN DEL 11-01-1994 ORE 16:49:29

E' interessante osservare che aumentare il numero di tratti di divisione non crea apprezzabili differenze nel valore del moltiplicatore di rottura. Per $t = 80$, infatti, si ottiene:

MULTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.44388176642273

MULTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.44388176643544

con una minima diminuzione.

8.9. Il programma AR2

Il programma AR2, riportato in Appendice 8.2. insieme alle sue subroutine, è una modifica del programma AR1 per l'analisi al collasso statico, ed esegue l'analisi

limite al collasso incrementale per un arco in conglomerato armato.

La principale modifica della fase di input riguarda l'eliminazione del segmento relativo ai carichi, e l'introduzione dei sei vettori M_{imax} , M_{emax} , M_{imin} , M_{emin} , M_{ig} ed M_{eg} , contenenti i momenti intradossali ed estradossali massimi e minimi, e da peso proprio.

Anche in questo caso il corpo principale del programma si riduce ad un loop, in cui vengono calcolati iterativamente i coefficienti cinematicamente sufficienti e staticamente ammissibili. Si comincia quindi, a partire da un assegnato meccanismo di tentativo, a chiamare la subroutine "CernierePlastiche", identica all'omonima subroutine del programma AR1. Poi la subroutine "LavoroMomenti" calcola numeratore e denominatore delle formule esprimenti il coefficiente cinematicamente sufficiente.

Più precisamente, in ipotesi di carico proporzionale sarà:

$$\gamma = \frac{\sum_{h=1}^4 M_{0h} \Delta\phi_h}{\sum_{h=1}^4 (M_{gh} + M_{mh}) \Delta\phi_h} \quad (8.121)$$

mentre in ipotesi di aumento non proporzionale del carico occorrerà scrivere:

$$\gamma = \frac{\sum_{h=1}^4 (M_{0h} - M_{gh}) \Delta\phi_h}{\sum_{h=1}^4 M_{mh} \Delta\phi_h} \quad (8.122)$$

In ambedue queste formule si dovrà porre:

$$\Delta\phi > 0, \quad \text{cerniera all'intradosso} \implies \begin{cases} M_0 = \sigma_{c0} A_c b \\ M_g = M_{ig} \\ M_m = M_{imax} \end{cases} \quad (8.123)$$

$$\Delta\phi > 0, \quad \text{cerniera all'estradosso} \implies \begin{cases} M_0 = \sigma_{f0} A_f b \\ M_g = M_{eg} \\ M_m = M_{emax} \end{cases} \quad (8.124)$$

$$\Delta\phi < 0, \quad \text{cerniera all'intradosso} \implies \begin{cases} M_0 = -\sigma_{f0} A_f b \\ M_g = M_{ig} \\ M_m = M_{imin} \end{cases} \quad (8.125)$$

$$\Delta\phi < 0, \quad \text{cerniera all'estradosso} \implies \begin{cases} M_0 = -\sigma_{c0} A_c b \\ M_g = M_{eg} \\ M_m = M_{emin} \end{cases} \quad (8.126)$$

Ciò fatto, il calcolo di γ diviene immediato, ed è eseguito nella subroutine "EstremoSuperiore".

Il primo passo per ottenere il corrispondente ψ è il calcolo dei momenti residui all'intradosso ed all'estradosso. A ciò fare, nella subroutine "MomentiResidui" si comincia con il calcolare i momenti M_1 , M_2 ed M_3 della Figura 8.18, ove però le forze applicate devono essere considerate nulle, poichè tali momenti sono quelli residui nelle tre sezioni 1,2 e 4.

Si ha quindi, secondo la 8.94:

$$M_h = M_{0h} - \gamma(M_{gh} + M_{mh}) \quad h=1,2,3 \quad (8.127)$$

nel caso di carico proporzionale, oppure da:

$$M_h = M_{0h} - M_{gh} + \gamma M_{mh} \quad h=1,2,3 \quad (8.128)$$

nel caso di carico non proporzionale. In ambedue i casi, M_{0h} , M_{gh} ed M_{mh} sono forniti dalle (8.123 – 8.126).

Si noti che i tre momenti residui M_1 , M_2 ed M_3 si trovano memorizzati nel vettore di comodo MRES, e che il calcolo dei momenti residui agli estremi, memorizzati nei vettori R1 ed R2, non presenta alcuna particolarità.

La subroutine “Fuoruscite”, molto simile all’omonima subroutine del programma AR1, calcola, sotto le T+1 dividenti, i rapporti:

$$r_h = \frac{M_{rh} + \gamma(M_{gh} + M_{mh})}{M_{0h}} \quad (8.129)$$

se il carico è di tipo proporzionale, oppure:

$$r_h = \frac{M_{rh} + \gamma M_{mh}}{M_{0h} - M_{gh}} \quad (8.130)$$

se i carichi non sono di tipo proporzionale. Tali valori definiscono per ogni sezione la massima fuoruscita dei diagrammi \tilde{M}_{imax} , \tilde{M}_{emax} , \tilde{M}_{imin} , \tilde{M}_{emin} , rispettivamente dalle curve $\sigma_{c0}A_c b$, $\sigma_{f0}A_f b$, $-\sigma_{f0}A_f b$, $-\sigma_{c0}A_c b$. Ed infatti il rapporto r è tratto dalla condizione:

$$\frac{M_r}{r} + \frac{\gamma}{r}(M_g + M_m) = M_0 \quad (8.131)$$

se il carico è proporzionale, oppure da:

$$\frac{M_r}{r} + M_g + \frac{\gamma}{r}M_m = M_0 \quad (8.132)$$

se il carico non è proporzionale. Dalla conoscenza del γ si trae il corrispondente ψ , secondo la subroutine “EstremoInferiore”, copia dell’omonima subroutine del programma AR1. Infine, la subroutine “CernieraVariata” si inserisce la nuova cerniera sotto la dividente per cui si verifica la massima fuoruscita.

8.10. Un esempio numerico

L'esempio è eseguito sullo stesso arco usato per l'analisi limite al collasso statico. In Tabella 8.1 sono consegnati i momenti da peso proprio M'_{ig} ed M''_{ig} , M'_{eg} ed M''_{eg} , rispettivamente a sinistra ed a destra di ciascuna dividente; i momenti $M_{\Delta t+}$ e $M_{\Delta t-}$ dovuti ad una variazione termica pari a $\pm 15^\circ$; i momenti M'_{Sd} ed M''_{Sd} (a sinistra ed a destra di ogni dividente) dovuti alle stesse forze di tipo sismico considerate nel caso dell'analisi a rottura statica.

In Tabella 8.2 sono forniti i momenti intradossali ed estradossali, massimi e minimi, per un carico accidentale uniformemente distribuito pari a $10t\ m^{-1}$, ed i momenti massimi e minimi per le tre combinazioni seguenti:

- peso proprio g e variazione termica $\Delta t = \pm 15^\circ$;
- peso proprio g , variazione termica $\Delta t = \pm 15^\circ$, forze sismiche verso destra e verso sinistra;
- peso proprio g , variazione termica $\Delta t = \pm 15^\circ$, carico accidentale $a = 10\ t\ m^{-1}$ uniformemente distribuito sui tratti più sfavorevoli.

	M'_g	M''_g	$M_{\Delta t}$	$M_{-\Delta t}$	M'_{Sd}	M''_{Sd}
M_{1e}	-6785	-	1269	-1269	-1545	-
M_{1i}	4166	-	1445	-1445	-2141	-
M_{2e}	-4924	-4564	628	-628	-36	-91
M_{2i}	4315	3955	783	-783	-553	-498
M_{3e}	-3554	-3317	127	-127	634	585
M_{3i}	3746	3508	270	-270	271	320
M_{4e}	-2831	-2689	-230	230	734	692
M_{4i}	3185	3042	-97	97	498	542
M_{5e}	-2491	-2424	-444	444	468	427
M_{5i}	2779	2712	-317	317	336	377
M_{6e}	-2374	-	-515	515	20	-20
M_{6i}	2612	-	-391	391	-20	20

Tabella 8.1- Momenti estremi minimi e massimi dovuti ad $a = 10t\ m^{-1}$

Per la condizione di carico a), in ipotesi di crescita non proporzionale, il file di ingresso dati si presenta come:

“ARCO DI PROVA”, VIDEOFILES, VIDEOFILES, “ES8-24.ING”, “ES8-24.USC”
 143,10,8.5,40000,2000,3.5,2,3.5,.3,.3,.3
 0.035261,0.035261,0.035261,0.01

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 471

<i>i</i>	<i>a</i>	$g \pm \Delta t$	$g \pm \Delta t \pm S$	$g \pm \Delta t \pm a$
M_{emin}	-5143	-8054	-9599	-13197
M_{imin}	3104	-5516	-3971	-2412
M_{emax}	3399	2721	580	-678
M_{imax}	5144	5611	7752	10755
M_{emin}	-2245	-5552	-5643	-7797
M_{imin}	723	-3936	-3845	-3213
M_{emax}	-610	3172	2619	2562
M_{imax}	2175	5098	5651	7283
M_{emin}	-2192	-3681	-4315	-5873
M_{imin}	1087	-3190	-2556	-2103
M_{emax}	-304	3238	2918	2934
M_{imax}	1660	4016	3238	5676
M_{emin}	-2293	-3061	-3795	-5354
M_{imin}	1452	-2459	-1725	-1007
M_{emax}	-993	2945	2403	1952
M_{imax}	2201	3282	3824	5483
M_{emin}	-1681	-2935	-3403	-4616
M_{imin}	986	-1980	-1512	-994
M_{emax}	-784	2395	2018	1611
M_{imax}	1904	3096	3473	5000
M_{emin}	-1296	-2889	-2909	-4185
M_{imin}	643	-1859	-1839	-1216
M_{emax}	-425	2221	2241	1796
M_{imax}	1510	3003	3023	4513

Tabella 8.2- Momenti estremi minimi e massimi dovuti a tre combinazioni di carico

1,5,10,11,EXTR,INTR,EXTR,INTR

DATI, "NON PROPORZIONALE"

0,10.44,18.56,24.36,27.84,29,27.84,24.36,18.56,10.44,0

5611,5098,4016,3282,3096,3003,3096,3282,4016,5098,5611

-5516,-3936,-3190,-2459,-1980,-1859,-1980,-2459,-3190,-3936,-5516

2721,3172,3238,2945,2395,2221,2395,2945,3238,3172,2721

-8054,-5552,-3681,-3061,-2935,-2889,-2935,-3061,-3681,-5552,-8054

4166,4315,3746,3185,2779,2612,2779,3185,3746,4315,4166

-6785,-4924,-3554,-2831,-2491,-2374,-2491,-2831,-3554,-4924,-6785

e conduce ai risultati:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.77225622009063

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.77225622009063

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
2	14.3	INTR	CONGLOMERATO
11	143	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOM. INTRADOSSALI MAX.	MOM. INTRADOSSALI MIN.
1	5611	-5516
2	5098	-3936
3	4016	-3190
4	3282	-2459
5	3096	-1980
6	3003	-1859
7	3096	-1980
8	3282	-2459
9	4016	-3190
10	5098	-3936
11	5611	-5516

DIV.	MOM. ESTRADOSSALI MAX.	MOM. ESTRADOSSALI MIN.
1	2721	-8054
2	3172	-5552
3	3238	-3681
4	2945	-3061
5	2395	-2935
6	2221	-2889
7	2395	-2935
8	2945	-3061
9	3238	-3681
10	3172	-5552
11	2721	-8054

DIV.	MOM. ESTR. DA PESO PROPRIO	MOM. INTR. DA PESO PROPRIO
1	4166	-6785
2	4315	-4924
3	3746	-3554
4	3185	-2831

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 473

5	2779	-2491
6	2612	-2374
7	2779	-2491
8	3185	-2831
9	3746	-3554
10	4315	-4924
11	4166	-6785

DIV.	MOM. INTRADOSSALI RESIDUI	MOM. ESTRADOSSALI RESIDUI
1	3739.87034907146	3208.75159660996
2	1746.03778997795	1279.51954484541
3	201.694732181403	-227.409872469859
4	-902.438346694543	-1302.7571329595
5	-1565.41668513113	-1947.46699814227
6	-1786.50363942105	-2162.27611172546
7	-1565.41668513113	-1947.46699814227
8	-902.438346694542	-1302.7571329595
9	201.694732181405	-227.409872469857
10	1746.03778997796	1279.51954484541
11	3739.87034907146	3208.75159660996

DIV.	MOMENTI LIMITE FERRO	MOMENTI LIMITE CONGLOMEARTO
1	4936.54	17850
2	4174.9024	15096
3	3582.5176	12954
4	3159.3856	11424
5	2905.5064	10506
6	2820.88	10200
7	2905.5064	10506
8	3159.3856	11424
9	3582.5176	12954
10	4174.9024	15096
11	4936.54	17850

TEMPO DI ESECUZIONE = 15.4921875 SEC.

RUN DEL 11-03-1994 ORE 20:57:58

Per la condizione di carico b), invece, il programma fornisce:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.42550829392954
MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.42591942452206

474 *Le strutture ad arco*

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
2	14.3	INTR	CONGLOMERATO
6	71.5	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOM. INTRADOSSALI MAX.	MOM. INTRADOSSALI MIN.
1	5611	-5516
2	5098	-3936
3	4016	-3190
4	3282	-2459
5	3096	-1980
6	3003	-1859
7	3096	-1980
8	3282	-2459
9	4016	-3190
10	5098	-3936
11	5611	-5516

DIV.	MOM. ESTRADOSSALI MAX.	MOM. ESTRADOSSALI MIN.
1	2721	-8054
2	3172	-5552
3	3238	-3681
4	2945	-3061
5	2395	-2935
6	2221	-2889
7	2395	-2935
8	2945	-3061
9	3238	-3681
10	3172	-5552
11	2721	-8054

DIV.	MOM. INTRADOSSALI RESIDUI	MOM. ESTRADOSSALI RESIDUI
1	3903.34540782185	3309.21834048278
2	1673.82045697389	1151.96543661957
3	-52.9589509394176	-532.948151636524
4	-1287.36935788351	-1735.14588232007
5	-2028.35446385572	-2455.68405543373

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 475

6	-2275.09087109312	-2695.38606874043
7	-2027.26318969099	-2454.56731214489
8	-1285.18802740939	-1732.91117788707
9	-49.6898337087288	-529.593216506527
10	1678.17429163838	1156.44367176933
11	3908.78578644786	3314.81804912458

TEMPO DI ESECUZIONE = 11.96875 SEC.

RUN DEL 11-03-1994 ORE 20:58:29

Infine, per la condizione di carico c) si ottiene:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.02272076181246

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.02272076181246

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
5	57.2	INTR	CONGLOMERATO
11	143	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV.	MOM. INTRADOSSALI MAX.	MOM. INTRADOSSALI MIN.
1	10755	-2412
2	7283	-3213
3	5676	-2103
4	5483	-1007
5	5000	-994
6	4513	-1216
7	5000	-994
8	5483	-1007
9	5676	-2103
10	7283	-3213
11	10755	-2412

DIV.	MOM. ESTRADOSSALI MAX.	MOM. ESTRADOSSALI MIN.
1	-678	-13197
2	2562	-7797
3	2934	-5873
4	1952	-5354
5	1611	-4616
6	1796	-4185

476 *Le strutture ad arco*

7	1611	-4616
8	1952	-5354
9	2934	-5873
10	2562	-7797
11	-678	-13197

DIV. MOM. INTRADOSSALI RESIDUI MOM. ESTRADOSSALI RESIDUI

1	2589.98351299636	2586.00626253648
2	2575.05281919984	2571.55932570823
3	2563.48810018291	2560.27477646146
4	2555.21986680688	2552.22210393484
5	2550.25519386091	2547.39423333922
6	2548.59959765658	2545.78564836302
7	2550.25519386091	2547.39423333922
8	2555.21986680688	2552.22210393484
9	2563.4881001829	2560.27477646146
10	2575.05281919984	2571.55932570823
11	2589.98351299636	2586.00626253647

TEMPO DI ESECUZIONE = 9.5546875 SEC.

RUN DEL 11-03-1994 ORE 20:58:49

in ipotesi di carico proporzionale, e:

MOLTIPLICATORE STATICAMENTE AMMISSIBILE = 1.03322990195581

MOLTIPLICATORE CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE = 1.03322990195581

CERNIERA	ASCISSA	LOCAZIONE	CRISI
1	0	EXTR	CONGLOMERATO
5	57.2	INTR	CONGLOMERATO
11	143	EXTR	CONGLOMERATO
11	143	INTR	CONGLOMERATO

DIV. MOM. INTRADOSSALI MAX. MOM. INTRADOSSALI MIN.

1	10755	-2412
2	7283	-3213
3	5676	-2103
4	5483	-1007
5	5000	-994
6	4513	-1216
7	5000	-994

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 477

8	5483	-1007
9	5676	-2103
10	7283	-3213
11	10755	-2412

DIV.	MOM. ESTRADOSSALI MAX.	MOM. ESTRADOSSALI MIN.
1	-678	-13197
2	2562	-7797
3	2934	-5873
4	1952	-5354
5	1611	-4616
6	1796	-4185
7	1611	-4616
8	1952	-5354
9	2934	-5873
10	2562	-7797
11	-678	-13197

DIV.	MOM. INTRADOSSALI RESIDUI	MOM. ESTRADOSSALI RESIDUI
1	2571.61240446526	2570.53501611083
2	2567.56786269397	2566.62151816725
3	2564.4351221948	2563.56467222153
4	2562.1953592126	2561.38330202881
5	2560.85049022095	2560.0754911155
6	2560.40200952099	2559.63974518048
7	2560.85049022095	2560.0754911155
8	2562.1953592126	2561.38330202881
9	2564.4351221948	2563.56467222153
10	2567.56786269398	2566.62151816725
11	2571.61240446526	2570.53501611083

TEMPO DI ESECUZIONE = 14.8359375 SEC.

RUN DEL 11-03-1994 ORE 21:00:57

in ipotesi di carico non proporzionale. Ovviamente i momenti limite ed i momenti estremi da peso proprio sono stati riportati per il solo primo caso, ripetendosi essi identici negli altri esempi.



Appendice 8.1. Il programma AR1

```
DEFDBL A-Z
DECLARE SUB CernieraVariata ()
DECLARE SUB Fuoruscite ()
DECLARE SUB EstremoSuperiore ()
DECLARE SUB MomentiEstremi ()
DECLARE SUB EstremoInferiore ()
DECLARE SUB LavoroInterno ()
DECLARE SUB CernierePlastiche ()
DECLARE SUB LavoroEsterno ()
DECLARE SUB Geometria ()
DECLARE SUB UscitaDati ()
DECLARE SUB UscitaRisultati ()
DECLARE SUB IngressoDati ()
DECLARE SUB IngressoDatiArray ()
DECLARE SUB OpenFiles ()
REM *****
REM *
REM *          P R O G R A M M A    A R 1          *
REM *
REM *          di
REM *
REM *          V I N C E N Z O    F R A N C I O S I
REM *
REM *          Release 1.0.0. 5 Novembre 1987 (in BASIC HP)
REM *          Release 3.0.0. Ottobre 1994 (in Microsoft QBasic)
REM *
REM *****
REM
REM
REM *****
REM *
REM *          Questo programma esegue l'analisi limite per collasso statico
REM *
```



```

REDIM FVERT(T) AS DOUBLE, Q(T + 1) AS DOUBLE, FACCV(T) AS DOUBLE
REDIM FACCO(T) AS DOUBLE, INCL(T + 1) AS DOUBLE
REDIM B(T + 1) AS DOUBLE, S(T + 1) AS DOUBLE, C(T + 1) AS DOUBLE
REDIM MINTR(T + 1) AS DOUBLE, MEXTR(T + 1) AS DOUBLE
REDIM MINTRP(T + 1) AS DOUBLE, MEXTRP(T + 1) AS DOUBLE
REDIM R(T + 1) AS DOUBLE, G(T + 1) AS DOUBLE, WCERN1$(T + 1)
REM -----
REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER L'INGRESSO DEI DATI IN ARRAY
REM -----
CALL IngressoDatiArray
REM -----
REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER RIEMPIRE ALCUNI ARRAY
REM -----
CALL Geometria
REM -----
REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER STAMPARE I DATI DI INGRESSO
REM -----
TIME2 = TIMER - TIME1
CALL UscitaDati
TIME1 = TIMER
REM -----
REM COMINCIA IL CALCOLO RIPETITIVO DEL MOLTIPLICATORE
REM CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE
REM -----
DO
  REM -----
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER IL CALCOLO DELLE COORDINATE
  REM DELLE CERNIERE PLASTICHE E DEL CENTRO DI ROTAZIONE
  REM DEL TRATTO MEDIO
  REM -----
  CALL CernierePlastiche
  REM -----
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER IL CALCOLO DEGLI ANGOLI
  REM DI ROTAZIONE E DEL LAVORO DELLE FORZE ESTERNE
  REM -----
  CALL LavoroEsterno
  REM -----
  REM ESEGUE IL TEST SUL VERSO DEL MECCANISMO
  REM -----
  IF COLLASSO$ = "PROPORZIONALE" THEN
    IF LPROP + LACCV + LACCO < 0 THEN
      F1 = -F1

```

```

      CALL LavoroEsterno
    END IF
  ELSE
    IF LACCV + LACCO < 0 THEN
      F1 = -F1
      CALL LavoroEsterno
    END IF
  END IF
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER CALCOLARE IL LAVORO DELLE
  REM FORZE INTERNE
  REM _____
  CALL LavoroInterno
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER CALCOLARE IL COEFFICIENTE
  REM CINEMATICAMENTE SUFFICIENTE
  REM _____
  CALL EstremoSuperiore
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER CALCOLARE I MOMENTI
  REM INTRADOSSALI ED ESTRADOSSALI
  REM _____
  CALL MomentiEstremi
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER IL CALCOLO DELLE FUORUSCITE
  REM DALLA FRONTIERA LIMITE
  REM _____
  CALL Fuoruscite
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER CALCOLARE IL COEFFICIENTE
  REM STATICAMENTE AMMISSIBILE
  REM _____
  CALL EstremoInferiore
  PRINT "GAMMA ="; GAMMA
  PRINT "PSI ="; PSI
  PRINT
  REM _____
  REM TEST DI USCITA DAL CICLO
  REM _____
  IF (GAMMA - PSI) / PSI < MAXR THEN EXIT DO
  REM _____
  REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER VARIARE LA POSIZIONE DELLE

```



```

REM CERNIERE
REM _____
CALL CernieraVariata
LOOP
REM _____
REM CHIAMA LA SUBROUTINE PER CALCOLARE STAMPARE I RISULTATI
REM _____
TIME2 = TIME2 + TIMER - TIME1
CALL UscitaRisultati
REM _____
REM REM CHIUDE TUTTI I BUFFER TEMPORANEI
REM _____
CLOSE
END

```

```

SUB CernieraVariata
REM
REM *****
REM *
REM *           C e r n i e r a V a r i a t a
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *
REM *           Questa subroutine varia sia le dividenti che le locazioni
REM *           delle quattro cerniere
REM *
REM *****
REM
SELECT CASE I9
CASE IS <= JCERN(1)
  JCERN(1) = I9
  WCERN$(1) = W9$
  G(JCERN(1)) = G9
CASE IS <= JCERN(2)
  IF G9 * F1 > 0 THEN
    JCERN(1) = I9
    WCERN$(1) = W9$
    G(JCERN(1)) = G9
  ELSE
    JCERN(2) = I9

```

```

        WCERN$(2) = W9$
        G(JCERN(2)) = G9
    END IF
CASE IS <= JCERN(3)
    IF G9 * (F2 - F1) > 0 THEN
        JCERN(2) = I9
        WCERN$(2) = W9$
        G(JCERN(2)) = G9
    ELSE
        JCERN(3) = I9
        WCERN$(3) = W9$
        G(JCERN(3)) = G9
    END IF
CASE IS <= JCERN(4)
    IF G9 * (F3 - F2) > 0 THEN
        JCERN(3) = I9
        WCERN$(3) = W9$
        G(JCERN(3)) = G9
    ELSE
        JCERN(4) = I9
        WCERN$(4) = W9$
        G(JCERN(4)) = G9
    END IF
CASE IS > JCERN(4)
    JCERN(4) = I9
    WCERN$(4) = W9$
    G(JCERN(4)) = G9
END SELECT
END SUB

```

SUB CernierePlastiche

```

REM
REM *****
REM *
REM *           C e r n i e r e P l a s t i c h e
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *
REM *
REM * Questa subroutine calcola le coordinate delle quattro cerniere plastiche,
REM * cfr. 8.77, e del centro di rotazione del tratto medio, cfr. 8.78

```

```

REM *
REM *****
REM
FOR I = 1 TO 4
  YCERN(I) = -Q(JCERN(I))
  ZCERN(I) = LTRAT * (JCERN(I) - 1)
  IF WCERN$(I) = "INTR" THEN
    YCERN(I) = YCERN(I) + B(JCERN(I)) / 2 * COS(INCL(JCERN(I)))
    ZCERN(I) = ZCERN(I) + B(JCERN(I)) / 2 * SIN(INCL(JCERN(I)))
  ELSE
    YCERN(I) = YCERN(I) - B(JCERN(I)) / 2 * COS(INCL(JCERN(I)))
    ZCERN(I) = ZCERN(I) - B(JCERN(I)) / 2 * SIN(INCL(JCERN(I)))
  END IF
NEXT I
K5 = (ZCERN(2) - ZCERN(1)) * (YCERN(3) - YCERN(4))
K5 = K5 - (ZCERN(4) - ZCERN(3)) * (YCERN(1) - YCERN(2))
YAUX = (YCERN(1) * ZCERN(2) - YCERN(2) * ZCERN(1)) * (YCERN(3) - YCERN(4))
YAUX1 = (YCERN(3) * ZCERN(4) - YCERN(4) * ZCERN(3)) * (YCERN(1) - YCERN(2))
YCERN(5) = (YAUX - YAUX1) / K5
ZAUX = (YCERN(1) * ZCERN(2) - YCERN(2) * ZCERN(1)) * (ZCERN(3) - ZCERN(4))
ZAUX1 = (YCERN(3) * ZCERN(4) - YCERN(4) * ZCERN(3)) * (ZCERN(1) - ZCERN(2))
ZCERN(5) = (ZAUX - ZAUX1) / K5
END SUB

SUB EstremoInferiore
REM
REM *****
REM *
REM *           E s t r e m o I n f e r i o r e
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *
REM *           Questa subroutine calcola il coefficiente staticamente
REM *           ammissibile
REM *
REM *****

```

```

REM
K9 = 1
FOR I = 1 TO T + 1
  IF R(I) > K9 THEN
    K9 = R(I)
    I9 = I
    W9$ = WCERN1$(I)
    G9 = G(I)
  END IF
NEXT I
PSI = GAMMA / K9
END SUB

SUB EstremoSuperiore
REM
REM *****
REM *
REM *           E s t r e m o S u p e r i o r e
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *
REM * Questa subroutine calcola il coefficiente cinematicamente sufficiente
REM *
REM *****
REM
IF COLLASSO$ = "PROPORZIONALE" THEN
  GAMMA = LINT / (LPROP + LACCV + LACCO) 'cfr 8.70
ELSE
  GAMMA = (LINT - LPROP) / (LACCV + LACCO)
END IF
END SUB

SUB Fuoruscite
REM
REM *****
REM *
REM *           F u o r u s c i t e
REM *
REM *****
REM

```

```

REM *****
REM *
REM *          Questa subroutine calcola le fuoruscite dalla frontiera
REM *
REM *          limite
REM *
REM *****
REM
DIM B1(2), A1(2, 2)
FOR I = 1 TO T + 1
  R(I) = 0
  G(I) = 0
  WCERN1$(I) = ""
NEXT I
IF COLLASSO$ = "PROPORZIONALE" THEN
  FOR I = 1 TO T + 1
    IF MEXTR(I) >= 0 THEN
      K7 = MEXTR(I) / (TLIM * C(I) * B(I))
      IF K7 > .999999 THEN
        R(I) = K7
        WCERN1$(I) = "EXTR"
        G(I) = 1
      END IF
    ELSE
      K7 = -MEXTR(I) / (CLIM * LARG * S(I) * B(I))
      IF K7 > .999999 THEN
        R(I) = K7
        WCERN1$(I) = "EXTR"
        G(I) = -1
      END IF
    END IF
  IF MINTR(I) >= 0 THEN
    K8 = MINTR(I) / (CLIM * LARG * S(I) * B(I))
    IF K8 > .999999 AND K8 > K7 THEN
      R(I) = K8
      WCERN1$(I) = "INTR"
      G(I) = 1
    END IF
  ELSE
    K8 = -MINTR(I) / (TLIM * C(I) * B(I))
    IF K8 > .999999 AND K8 > K7 THEN
      R(I) = K8
      WCERN1$(I) = "INTR"
    END IF
  END IF

```

```

      G(I) = -1
    END IF
  END IF
  NEXT I
ELSE
  REM -----
  REM CALCOLO DEI MOMENTI DA PESO PROPRIO
  REM -----
  F7 = 0: F8 = 0
  I2 = INT(T / 2)
  FOR I = 1 TO T
    F7 = F7 + FVERT(I) * (LTRAT * (I - 1) + LTRAT / 2)
  NEXT I
  FOR I = I2 TO T
    F8 = F8 + FVERT(I) * (LTRAT * (I - 1) + LTRAT / 2 - LTRAT * (I2 - 1))
  NEXT I
  B1(1) = F7
  B1(2) = F8
  A1(1, 1) = -RIAL
  A1(1, 2) = -LUCE
  A1(2, 1) = Q(I2) - RIAL
  A1(2, 2) = LTRAT * (I2 - 1) - LUCE
  DET = A1(1, 1) * A1(2, 2) - A1(1, 2) * A1(2, 1)
  H2 = (B1(1) * A1(2, 2) - B1(2) * A1(1, 2)) / DET
  V2 = -(B1(1) * A1(2, 1) - B1(2) * A1(1, 1)) / DET
  FOR I = 1 TO T + 1
    F7 = 0: M7 = 0
    FOR J = I TO T
      F7 = F7 + FVERT(J)
      M7 = M7 + FVERT(J) * (LTRAT * (J - I) + LTRAT / 2)
    NEXT J
    N = -(V2 + F7) * SIN(INCL(I)) + H2 * COS(INCL(I))
    M = -V2 * (LUCE - LTRAT * (I - 1)) + H2 * (Q(I) - RIAL) - M7
    MINTRP(I) = M - N * B(I) / 2
    MEXTRP(I) = M + N * B(I) / 2
  NEXT I
  FOR I = 1 TO T + 1
    IF MEXTR(I) >= 0 THEN
      K7 = (MEXTR(I) - MEXTRP(I)) / (TLIM * C(I) * B(I) - MEXTRP(I))
      IF K7 > .999999 THEN
        R(I) = K7
        WCERN1$(I) = "EXTR"
      END IF
    END IF
  NEXT I

```

```

      G(I) = 1
    END IF
  ELSE
    K7 = (MEXTR(I) - MEXTRP(I)) / (-CLIM * LARG * S(I) * B(I) - MEX-
      TRP(I))
    IF K7 > .999999 THEN
      R(I) = K7
      WCERN1$(I) = "EXTR"
      G(I) = -1
    END IF
  END IF
  IF MINTR(I) >= 0 THEN
    K8 = (MINTR(I) - MINTRP(I)) / (CLIM * LARG * S(I) * B(I) - MINTRP(I))
    IF K8 > .999999 AND K8 > K7 THEN
      R(I) = K8
      WCERN1$(I) = "INTR"
      G(I) = 1
    END IF
  ELSE
    K8 = (MINTR(I) - MINTRP(I)) / (-TLIM * C(I) * B(I) - MINTRP(I))
    IF K8 > .999999 AND K8 > K7 THEN
      R(I) = K8
      WCERN1$(I) = "INTR"
      G(I) = -1
    END IF
  END IF
NEXT I
END IF
END SUB

```

SUB Geometria

```

REM
REM *****
REM *
REM *           G e o m e t r i a
REM *
REM *****
REM _____
REM Riempimento dell'array delle quote, se descritte da funzioni
REM _____
IF ASSE$ = "FUNC" THEN
  FOR I = 1 TO T + 1

```

```

      Z = LTRAT * (I - 1)
      Q(I) = FNQ(Z)
    NEXT I
  END IF
  REM -----
  REM Riempimento degli array dei carichi, se descritti da funzioni
  REM -----
  IF CARICHI$ = "FUNC" THEN
    FOR I = 1 TO T
      Z1 = LUCE / T * (I - 1)
      Z2 = LUCE / T * I
      FVERT(I) = (FNF(Z1) + FNF(Z2)) / 2 * LTRAT
      FACCV(I) = (FNP(Z1) + FNP(Z2)) / 2 * LTRAT
      FACCO(I) = (FNT(Z1) + FNT(Z2)) / 2 * LTRAT
    NEXT I
  END IF
  REM -----
  REM Riempimento degli array delle inclinazioni dei tratti
  REM -----
  INCL(1) = ATN(Q(2) / LUCE * T)
  FOR I = 2 TO T
    INCL(I) = ATN((Q(I + 1) - Q(I - 1)) / LUCE / 2 * T)
  NEXT I
  INCL(T + 1) = ATN((Q(T + 1) - Q(T)) / LUCE * T)
  REM -----
  REM Riempimento degli array delle altezze, degli spessori e delle aree di ferro
  REM -----
  FOR I = 1 TO T + 1
    Z = LTRAT * (I - 1)
    B(I) = FNB(Z)
    S(I) = FNS(Z)
    C(I) = FNC(Z)
  NEXT I
  END SUB

SUB IngressoDati
REM
REM *****
REM *
REM *           I n g r e s s o D a t i
REM *
REM *****

```



```

REM
REM *****
REM *
REM *          Questa subroutine si occupa dell'ingresso dei dati          *
REM *          non organizzati in array                                     *
REM *
REM *****
REM *****
REM *
REM * LEGGE IL TITOLO DELLA STRUTTURA                                     *
REM * IL FLAG DI STAMPA PER LE VARIABILI DI INGRESSO                   *
REM * IL FLAG DI STAMPA PER LE VARIABILI DI USCITA                     *
REM *   - CARTA → I DATI VENGONO STAMPATI                               *
REM *   - VIDEO → I DATI VENGONO INVIATI A VIDEO                       *
REM *   - FILES → I DATI VENGONO MEMORIZZATI SU                        *
REM *     FILES DA SPECIFICARE                                          *
REM *   - VIDEOFILES → I DATI VENGONO INVIATI A                        *
REM *     VIDEO E MEMORIZZATI SU FILES                                   *
REM *   - CARTAFILES → I DATI VENGONO STAMPATI                          *
REM *     CARTA E MEMORIZZATI SU FILES                                  *
REM *   - TUTTO → I DATI VENGONO INVIATI A VIDEO,                      *
REM *     STAMPATI SU CARTA E MEMORIZZATI SU FILES                     *
REM *
REM *****
REM
INPUT #7, TITLE$
INPUT #7, STAMPA$
INPUT #7, STAMPARIS$
IF STAMPA$ = "FILES" OR STAMPA$ = "VIDEOFILES" OR STAMPA$ = "CAR-
  TATAFILES" OR STAMPA$ = "TUTTO" THEN
  INPUT #7, FILEINGR$
END IF
IF STAMPARIS$ = "FILES" OR STAMPARIS$ = "VIDEOFILES" OR STAMPARIS$ = "CAR-
  TATAFILES" OR STAMPARIS$ = "TUTTO" THEN
  INPUT #7, FILEUSC$
END IF
CALL OpenFiles
REM
REM *****
REM *
REM * LEGGE:
REM *   LUCE   Luce dell'arco

```

8. Verifica in fase elastica e calcolo a rottura 493

REM *	T	Numero di tratti di divisione	*
REM *	LARG	Larghezza della sezione (costante)	*
REM *	TLIM	Tensione limite dell'acciaio	*
REM *	CLIM	Compressione limite del conglomerato	*
REM *		(in valore assoluto)	*
REM *	HS	Altezza della sezione a sinistra	*
REM *	HC	Altezza della sezione al centro	*
REM *	HD	Altezza della sezione a destra	*
REM *	SPES	Spessore della soletta inferiore	*
REM *		(e superiore) a sinistra	*
REM *	SPEC	Spessore della soletta inferiore	*
REM *		(e superiore) al centro	*
REM *	SPED	Spessore della soletta inferiore	*
REM *		(e superiore) a destra	*
REM *	FERS	Area del ferro a sinistra	*
REM *	FERC	Area del ferro al centro	*
REM *	FERD	Area del ferro a destra	*
REM *	MAXR	Valore limite sul test di uscita	*
REM *	JCERN(4)	Indici delle dividenti dove sono	*
REM *		inizialmente ipotizzate le cerniere	*
REM *	WCERN\$(4)	INTR o EXTR a seconda che la	*
REM *		corrispondente cerniera sia all'intradosso	*
REM *		o all'estradosso	*
REM *	ASSE\$	Se l'asse dell'arco e' descritto da una	*
REM *		funzione, ASSE\$ = FUNZ, se invece e' dato	*
REM *	CARICHI\$	Se i carichi sull'arco sono descritti da	*
REM *		funzione, CARICHI\$ = FUNZ, se invece	*
REM *		sono dati per punti, allora CARICHI\$ = DATI	*
REM *	COLLASSO\$	PROPORZIONALE/NON PROPORZIONALE	*
REM *		se il collasso avviene per aumento proporzionale	*
REM *		(o meno) dei carichi.	*
REM *		Se l'asse e' definito da funzione:	*
REM *	FREC	Freccia dell'arco	*
REM *	RIAL	Rialzo a destra	*
REM *		Se i carichi sono descritti da funzione:	*
REM *	QPROPS	Peso proprio a sinistra	*
REM *	QPROPC	Peso proprio al centro	*
REM *	QPROPD	Peso proprio a destra	*
REM *	QACCVS	Carico accidentale verticale a sinistra	*
REM *	QACCVC	Carico accidentale verticale al centro	*
REM *	QACCVD	Carico accidentale verticale a destra	*
REM *	QACCOS	Carico accidentale orizzontale a sinistra	*

```

REM *      QACCOC   Carico accidentale orizzontale al centro      *
REM *      QACCOD   Carico accidentale orizzontale a destra      *
REM *
REM *****
INPUT #7, LUCE, T, LARG, TLIM, CLIM
INPUT #7, HS, HC, HD, SPES, SPEC, SPED, FERS, FERC, FERD, MAXR
FOR I = 1 TO 4
  INPUT #7, JCERN(I)
NEXT I
FOR I = 1 TO 4
  INPUT #7, WCERN$(I)
NEXT I
INPUT #7, ASSE$, CARICHI$, COLLASSO$
IF ASSE$ = "FUNC" THEN
  INPUT #7, FREC, RIAL
END IF
IF CARICHI$ = "FUNC" THEN
  INPUT #7, QPROPS, QPROPC, QPROPD
  INPUT #7, QACCVS, QACCVC, QACCVD
  INPUT #7, QACCOS, QACCOC, QACCOD
END IF
END SUB

SUB IngressoDatiArray
REM
REM *****
REM *
REM *      I n g r e s s o D a t i A r r a y
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *
REM *      Questa subroutine si occupa dell'ingresso dei dati
REM *      organizzati in array
REM *
REM *****
REM
REM -----
REM Legge le quote dell'arco
REM -----
IF ASSE$ = "DATI" THEN

```

```

FOR I = 1 TO T + 1
  INPUT #7, Q(I)
NEXT I
RIAL = Q(T + 1)
FREC = Q(T / 2 + 1) - RIAL / 2
END IF
REM -----
REM Legge i carichi verticali da peso proprio
REM -----
IF CARICHI$ = "DATI" THEN
  FOR I = 1 TO T
    INPUT #7, FVERT(I)
  NEXT I
END IF
REM -----
REM Legge i carichi verticali accidentali
REM -----
IF CARICHI$ = "DATI" THEN
  FOR I = 1 TO T
    INPUT #7, FACCV(I)
  NEXT I
END IF
REM -----
REM Legge i carichi orizzontali accidentali
REM -----
IF CARICHI$ = "DATI" THEN
  FOR I = 1 TO T
    INPUT #7, FACCO(I)
  NEXT I
END IF
END SUB

SUB LavoroEsterno
REM
REM *****
REM *
REM *          L a v o r o E s t e r n o
REM *
REM *****
REM
REM *****
REM *

```

```

REM *           Questa subroutine calcola il lavoro compiuto dalle forze           *
REM *           esterne per effetto del prescelto meccanismo                       *
REM *                                                                                   *
REM *****
REM
REM _____
REM CALCOLO DEGLI ANGOLI DI ROTAZIONE
REM _____
F2 = -F1 * (ZCERN(2) - ZCERN(1)) / (ZCERN(5) - ZCERN(2))
FAUX = F1 * (ZCERN(2) - ZCERN(1)) * (ZCERN(3) - ZCERN(5))
F3 = FAUX / ((ZCERN(5) - ZCERN(2)) * (ZCERN(4) - ZCERN(3)))
REM _____
REM CALCOLO DELLE TRE ALIQUOTE DI LAVORO ESTERNO
REM _____
LPROP = 0
LACCV = 0
LACCO = 0
FOR I = JCERN(1) TO JCERN(2) - 1
  V = -F1 * ((I - 1) * LTRAT + LTRAT / 2 - ZCERN(1))
  W = -F1 * ((Q(I) + Q(I + 1)) / 2 + YCERN(1))
  LPROP = LPROP + FVERT(I) * V
  LACCV = LACCV + FACCV(I) * V
  LACCO = LACCO + FACCO(I) * W
NEXT I
FOR I = JCERN(2) TO JCERN(3) - 1
  V = -F2 * ((I - 1) * LTRAT + LTRAT / 2 - ZCERN(5))
  W = -F2 * ((Q(I) + Q(I + 1)) / 2 + YCERN(5))
  LPROP = LPROP + FVERT(I) * V
  LACCV = LACCV + FACCV(I) * V
  LACCO = LACCO + FACCO(I) * W
NEXT I
FOR I = JCERN(3) TO JCERN(4) - 1
  V = -F3 * ((I - 1) * LTRAT + LTRAT / 2 - ZCERN(4))
  W = -F3 * ((Q(I) + Q(I + 1)) / 2 + YCERN(4))
  LPROP = LPROP + FVERT(I) * V
  LACCV = LACCV + FACCV(I) * V
  LACCO = LACCO + FACCO(I) * W
NEXT I
END SUB

SUB LavoroInterno
REM

```