



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
DELL'INNOVAZIONE DEL PRODOTTO

TITOLO:

***EFFETTI TRIDIMENSIONALI IN COMPONENTI  
CON INTAGLI PERIODICI***

**Relatore: *Ch.mo Prof. Berto Filippo***

**Correlatore: *Ing. Reza Afshar***

**Laureando: *Garzotto Denis***

Anno accademico:2012/2013



# Indice

<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>5</b>
<b>1. MODELLI 3-D PER PIASTRE SOGGETTE A MODO I IN PRESENZA DI INTAGLI PERIODICI .....</b>	<b>27</b>
1.1 CREAZIONE DEL MODELLO 3D IN ANSYS .....	29
1.2 OBIETTIVI.....	33
<b>2. MODELLO 1: <math>2\alpha=60^\circ</math>, <math>\rho=0.1\text{mm}</math>, <math>p=2.5\text{mm}</math>, <math>t=0.5\text{mm}</math>.....</b>	<b>35</b>
2.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	35
2.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	36
2.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	42
2.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	43
2.5 Grafico riassuntivo normalizzato.....	44
2.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE.....	45
2.6.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	45
2.6.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	46
2.6.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	47
2.6.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	48
<b>3. MODELLO 2: <math>2\alpha=60^\circ</math>, <math>\rho=1\text{mm}</math>, <math>p=25\text{mm}</math>, <math>t=5\text{mm}</math>.....</b>	<b>49</b>
3.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm.....	50
3.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm.....	51
3.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm.....	52
3.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm.....	53
3.5 Grafico riassuntivo normalizzato .....	54
3.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE.....	55
3.6.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	56
3.6.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	57

3.6.3	$2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	58
3.6.4	$2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	59
<b>4.</b>	<b>MODELLO 3: <math>2\alpha=120^\circ</math>, <math>\rho=0.1\text{mm}</math>, <math>p=2.5\text{mm}</math>, <math>t=0.5\text{mm}</math>.....</b>	<b>61</b>
4.1	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	62
4.2	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	63
4.3	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	64
4.4	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	65
4.5	Grafico riassuntivo normalizzato .....	66
4.6	INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE.....	67
4.6.1.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	68
4.6.2.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	69
4.6.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	70
4.6.4.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	71
<b>5.</b>	<b>MODELLO 4: <math>2\alpha=120^\circ</math>, <math>\rho=1\text{mm}</math>, <math>p=25\text{mm}</math>, <math>t=5\text{mm}</math>.....</b>	<b>73</b>
5.1	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	
5.2	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	75
5.3	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	76
5.4	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	77
5.5	Grafico riassuntivo normalizzato .....	78
5.6	INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE.....	79
5.6.1.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm .....	80
5.6.2.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm .....	81
5.6.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm .....	82
5.6.4.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm .....	83
<b>6.</b>	<b>RAGGIO ALL'APICE DELL'INTAGLIO PARI A ZERO: FATTORE DI INTENSIFICAZIONE DELLE TENSIONI <math>K_I</math>.....</b>	<b>85</b>
6.1	OBIETTIVO E PROCEDIMENTO .....	87

<b>7. MODELLO 5: <math>2\alpha=60^\circ</math>, <math>\rho=0\text{mm}</math>, <math>p=2.5\text{mm}</math>, <math>t=0.5\text{mm}</math>.....</b>	<b>89</b>
7.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 3 intagli e mezzo .....	90
7.1.1. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 4 intagli e mezzo .....	92
7.1.2. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 5 intagli e mezzo .....	94
7.1.3. Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	96
7.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 3 intagli e mezzo .....	98
7.2.1. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 4 intagli e mezzo .....	100
7.2.2. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 5 intagli e mezzo .....	102
7.2.3. Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	
7.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 3 intagli e mezzo .....	106
7.3.1. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 4 intagli e mezzo .....	108
7.3.2. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 5 intagli e mezzo 106.....	110
7.3.3. Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	112
7.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 3 intagli e mezzo .....	
7.4.1. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,114 4 intagli e mezzo .....	114
7.4.2. $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 5 intagli e mezzo .....	116
7.4.3. Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	118
<b>8. MODELLO 6: <math>2\alpha=120^\circ</math>, <math>\rho=0\text{mm}</math>, <math>p=2.5\text{mm}</math>, <math>t=0.5\text{mm}</math>.....</b>	<b>123</b>
8.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 3 intagli e mezzo .....	123
8.1.1. $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 4 intagli e mezzo .....	126
8.1.2. $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 5 intagli e mezzo .....	128

8.1.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 6 intagli e mezzo .....	130
8.1.4.	Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	132
8.2	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 3 intagli e mezzo .....	134
8.2.1.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 4 intagli e mezzo .....	136
8.2.2.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 5 intagli e mezzo .....	138
8.2.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 6 intagli e mezzo .....	140
8.2.4.	Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	142
8.3	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 3 intagli e mezzo .....	144
8.3.1.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 4 intagli e mezzo .....	146
8.3.2.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 5 intagli e mezzo .....	148
8.3.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 6 intagli e mezzo .....	150
8.3.4.	Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	152
8.4	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 3 intagli e mezzo .....	154
8.4.1.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 4 intagli e mezzo .....	155
8.4.2.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 5 intagli e mezzo .....	158
8.4.3.	$2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 6 intagli e mezzo .....	160
8.4.4.	Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali .....	162
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>165</b>

## **BIBLIOGRAFIA**

### **Fattori di concentrazione delle tensioni $K_t$ per intagli periodici determinati dal SED**

Si tratta di calcolare *i fattori di concentrazione delle tensioni (SCF)* per un determinato numero di lastre piane e tondi in presenza di intagli periodici a U e V. I componenti considerati sono soggetti a sollecitazioni di trazione, flessione e torsione. L'obiettivo principale è quello di considerare la densità di energia di deformazione locale (*SED*), calcolata su un volume di controllo che circonda l'apice dell'intaglio, stimando i *SCF* di ciascun componente, utilizzando una mesh relativamente grossolana. Sono stati esaminati oltre duecentocinquanta modelli, considerando componenti con diversi angoli di apertura dell'intaglio e diversa frequenza di periodicità di intagli a U e V, utilizzando simulazioni agli elementi finiti (*FE*). I risultati ottenuti tramite analisi *FE*, sono poi confrontati con i risultati forniti da ricercatori presenti nell'attuale letteratura o in quella passata. Inoltre, vengono confrontate due nuove espressioni del fattore di riduzione della profondità dell'intaglio per il caso di tensioni normali (trazione e flessione) e torsione, con i risultati ottenuti mediante l'approccio *SED*.

#### **1. INTRODUZIONE**

L'analisi della distribuzione delle tensioni in prossimità di una cricca e di un intaglio, sono temi di ricerca attuale per lo sviluppo di diversi criteri di rottura per materiali fragili e quasi-fragili [1-3]. In alcuni studi all'avanguardia, è stato utilizzato il metodo delle funzioni ai potenziali complessi per ottenere il campo di tensione e il fattore di intensificazione delle tensioni per una varietà di problemi di componenti criccati [4-7]. In seguito a questi studi, sono apparse in letteratura un vasto numero di pubblicazioni riguardanti le soluzioni di problemi nel caso di componenti criccati, con particolare attenzione sui fattori di intensificazione delle tensioni. Sono stati analizzati una serie infinita di intagli periodici equidistanti fra loro, con l'applicazione di diversi vincoli e sollecitazioni di carico [10]. Gli effetti della presenza di un intaglio, di solito, sono quantificati in termini di un fattore di concentrazione delle tensioni (*SCF*): è un fattore

che tiene conto della maggior tensione dovuta alla discontinuità, in questo caso l'intaglio, rispetto alla tensione nominale [11].

Ci sono diversi metodi per ottenere i *SCFs*:

- analitici, secondo la teoria dell'elasticità;
- numerici, utilizzando gli Elementi Finiti (*FE*);
- metodo degli elementi al contorno (*BEM*);
- sperimentali, come fotoelasticità o estensimetri.

E' stata usata per molti anni una formula geniale per la determinazione del *SCF* [12], utilizzata per un vasto range di forme di intaglio e delle rispettive condizioni di carico. Questa formula è conveniente per applicazioni ingegneristiche, grazie alla sua semplicità e capacità di dare valori approssimati per qualsiasi forma di intaglio [13]. Tuttavia, diversi ricercatori hanno osservato che la formula proposta in rif. [12] può portare ad una sottostima o sovrastima del *SCF*, rispettivamente nel caso di singoli intagli [13-17] e multi-intagli [18,19]. La valutazione dei *SCFs* non è solo una curiosità accademica, ma è molto importante per la progettazione di componenti e strutture reali. Sono stati dedicati grandi sforzi per fornire soluzioni utili in vari campi dell'ingegneria [20,21]. Il caso di multi-intagli è un caso pratico che vale la pena di studiare come sottolineato nella Refs. [18,19]. Applicando un approccio generale ai calcoli dei *SCF* per componenti indeboliti da intaglio periodico, è stato suggerito in [12] di sostituire l'intaglio periodico con un unico intaglio avente la stessa geometria di quello periodico, ma con una profondità minore. Recentemente tale approccio è stato trattato ed esteso per diversi angoli di apertura dell'intaglio, impiegando alcune analisi accurate per mezzo del *BEM* [18,19]. Per trattare con alcune geometrie specifiche, è stata utilizzata una tecnica di stima basata sul metodo delle *funzioni di Green* per risolvere problemi di intaglio periodico [22]. Sono state eseguite delle prove di fatica su componenti soggetti a flessione rotante per stimare il limite a fatica di campioni con intaglio doppio [24]. Utilizzando un modello agli elementi finiti 3-D elastic, è stato analizzato l'effetto di concentrazioni delle tensioni ai due apici dell'intaglio sui limiti di fatica. E' stata effettuata un'analisi di affidabilità dei test a fatica nel caso di campioni a multi-intaglio, al fine di trovare il numero ottimale di campioni necessari nelle prove [25]. La necessità



di un criterio semplice per applicazioni di ingegneria ha portato allo sviluppo di un punto chiave per la densità di energia di deformazione (*SED*), approccio valido per cricche [26-29] e intagli [30]. Il fattore *S* è stato definito come il prodotto del *SED* per una distanza critica dal punto di singolarità [28].

L'errore è generato da un valore critico di  $S_c$ , mentre la direzione di propagazione è stata determinata imponendo una condizione minima su *S*. La teoria è stata estesa per impiegare il *SED* totale vicino all'apice dell'intaglio [30], scegliendo come punto di riferimento, la superficie dell'intaglio dove si verifica il massimo valore di tensione tangenziale. In piccoli componenti, il rapporto tra la superficie e volume porta a considerare le discontinuità locali presenti nel materiale, pertanto, l'adozione di una multi-scaling e lo schema di segmentazione, è l'unico modo per capire ciò che accade a livello pico, nano e micro [31-33]. Seguendo percorsi paralleli, il concetto di *SED* media su un materiale dipendente dal volume di controllo, è stato prima formalizzato in rif.[34], con riferimento ad intagli a V in condizioni di carico statico e di fatica statica. È stato dimostrato che l'approccio si basa sul concetto di un valore di energia media in un piccolo, ma finito, volume di materiale, in grado di predire accuratamente sia il comportamento statico dei componenti gravemente intagliati, sia il comportamento a fatica dei giunti saldati [34]. Ulteriori studi furono poi effettuati in Refs [35,36] con riferimento a smussare gli intagli a U e V. Sono date alcune espressioni in forma chiusa per collegare il *SED* sul volume di controllo e la tensione di picco elastico sull'apice dell'intaglio. Per convalidare l'approccio, è stato utilizzato un grande bagaglio di dati sperimentali per provini in *PMMA* intagliati a V, testati in condizioni di carico di trazione [37-43]. Usando il concetto di *SED* combinato con una mesh grossolana nelle analisi *FE*, si sono compiute valutazioni di resistenza a fatica di giunti saldati[44]. Più recentemente, è stata presentata una procedura per il calcolo rapido del fattore intensificazione delle tensioni (*NSIF*) e del *SCF* in base al *SED*, utilizzando una mesh grossolana[45]. In presenza di forti intagli a V, la distribuzioni delle tensioni sono singolari e l'intensità dei campi di tensione è data in termini di fattori di intensificazione delle tensioni (*NSIFs*), che sono largamente utilizzati in letteratura per le valutazioni di resistenza a fatica di giunti saldati e altri componenti intagliati. Sono necessarie mesh molto raffinate per determinare direttamente gli *NSIFs* dalla distribuzione delle sollecitazioni locali, in particolare, quando l'intento dell'analisi agli elementi finiti è di

determinare il valore medio della densità di energia di deformazione locale su un volume di controllo che circonda i punti di tensioni singolari.

Il *SED*, infatti, può essere derivato direttamente da spostamenti nodali moltiplicato per la matrice di rigidità degli elementi finiti, così che con mesh anche grossolane è in grado di fornire valori sufficientemente precisi. Il calcolo dell'energia di deformazione elastica non implica tensioni e sforzi. D'altra parte, diversamente dal *SED*, la valutazione delle tensioni richiede i derivati degli spostamenti nodali e questa è la causa di una minore precisione.

Trattare con intagli contudenti, non appena il *SED* è noto, il *SCF* può essere determinato a posteriori sulla base di semplici espressioni che collegano il *SED* locale con il *SCF* in problemi piani. Generalmente, non esiste un metodo numerico efficace per analizzare tutte le forme di intaglio con meno dell'1% di errore [13]. È bene notare come, meshando modelli *FE*, il risultato dipenda direttamente dalla densità di maglia. Pertanto, la valutazione dei *SCF* in un modello utilizzando una mesh grossolana, è un notevole vantaggio del metodo *SED*. Questo è vero, in particolare, nel caso si tratti con componenti tridimensionali complessi, per i quali è verificata una relazione lineare tra sforzo e deformazione, ma anche in quei casi in cui l'ipotesi di linearità cessa la sua validità a causa degli effetti di bordo o della stretta spaziatura tra gli intagli. È stato studiato l'effetto di intagli periodici sui *SCF* mediante il *SED*, utilizzato con maglie molto grossolane. Vengono trattate un certo numero di lastre piane e barre tonde indebolite da intagli periodici a U e V soggette a carichi di trazione, flessione e torsione con lo scopo di studiare le zone di concentrazione delle tensioni nell'ipotesi di essere in campo lineare elastico. Gli obiettivi principali di questo lavoro sono i seguenti:

- la valutazione del *SED* locale sul un volume di controllo circostante l'apice dell'intaglio nel caso di componenti multi intagliati e la stima del corrispondente *SCF* utilizzando nei modelli *FE* mesh grossolane;
- valutare l'effetto dell'acutezza dell'intaglio e della profondità sulla concentrazione delle tensioni confrontando i risultati con le equazioni disponibili in letteratura per intagli periodici, in particolare, con le nuove espressioni modificate proposte in

Refs[18,19]. Sono state effettuate molteplici analisi che vanno da piccole a grandi distanze fra gli intagli.

- fornire due nuove equazioni per il fattore di riduzione della profondità di intaglio per i casi di sollecitazioni a (trazione e flessione) e torsione, adatte a qualsiasi forma di intaglio. Queste nuove equazioni, che si basano sui risultati ottenuti agli elementi finiti col *SED* utilizzando mesh grossolane, possono essere utilizzate in combinazione con le equazioni disponibili per singoli intagli, allo scopo di determinare i *SCF* nel caso di intagli periodici.

## 2. MODELLAZIONE DI INTAGLI PERIODICI

Le geometrie considerate, cioè i principali parametri geometrici, sono mostrati nella Fig.1.

Le analisi sono state effettuate per diversi valori dell'angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha$ , la frequenza relativa di intaglio periodico  $t/P$ , e infine, l'acutezza dell'intaglio  $\rho/t$ . La profondità relativa dell'intaglio  $t/d$ , si presume pari a 0,1 per tutti i casi.

Sono state analizzate 250 geometrie differenti tra lastre piane e barre tonde, combinando i seguenti parametri geometrici:

$$2\alpha = 0^\circ \text{ e } 60^\circ; t/d = 0.1; \quad t/P = 0.01, 0.02, 0.04, \dots, 2; \quad \rho/t = 0.2, 0.4, \dots, 2;$$

Sfruttando la simmetria delle lastre piane e delle barre tonde, per semplicità, è stata modellata solo un quarto della geometria totale ed il numero di intagli periodici presenti è pari a 10 per tutti i modelli trattati.

### 3. MODELLAZIONE E VALUTAZIONE DEL SED

Il codice commerciale ANSYS viene utilizzato per eseguire analisi FE, cioè agli elementi finiti. Il materiale viene assunto isotropo, con modulo elastico  $E = 206.000\text{MPa}$  e rapporto di Poisson  $\nu = 0,3$ . Sono utilizzati due tipi di elementi in FEA: solid 8 nodi 82, utilizzato per lastre piane e tondi sottoposti a sollecitazione di trazione, con opzioni chiave di tensione piana e assial-simmetria. Inoltre, per il caso di barre tonde soggette a flessione e torsione, che sono strutture assial-simmetriche con il carico applicato non simmetrico, è utilizzato l'elemento piano armonico 83.

Per ridurre eventuali errori di calcolo, è stata sviluppata una subroutine ANSYS parametric design language (APDL), trattando poi i diversi casi semplicemente cambiando i quattro rapporti geometrici definiti nel paragrafo precedente. Di seguito, sono ampiamente discussi i risultati di tre casi di carico.

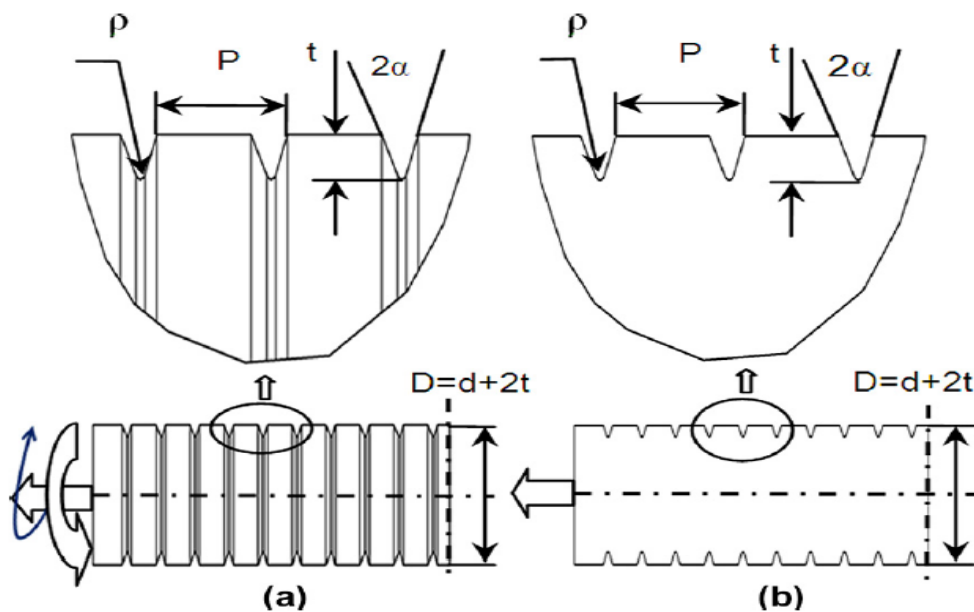


Fig. 1. Schematic of the geometries used for the periodic notch analysis; (a): round bar (b): flat plate.

### 3.1 TRAZIONE

L'energia di deformazione media sul volume di controllo mostrato nella Fig. 2, può essere espressa in funzione della massima sollecitazione elastica all'apice dell'intaglio in base al rif. [36]:

$$\overline{W}_1 = F(2\alpha) \times H\left(2\alpha, \frac{R_c}{\rho}\right) \times \frac{\sigma_{max}^2}{E} \quad (1)$$

dove i parametri  $F$  e  $H$  (dati in Rif. [36]) sono presi da tabella. Questa equazione ci permette di valutare la tensione elastica massima utilizzando il valore medio del  $SED$ . La media di questa equazione è ottenuta su un volume di controllo dato. Il valore  $SED$  è quasi indipendente dalla mesh, discusso in Refs. [44,45] e può essere determinato con precisione anche con maglie molto grossolane. Appena  $E1$  (l'energia di deformazione elastica) è numericamente determinata sull'area di controllo  $\Omega$  all'apice dell'intaglio (quest'ultima calcolata utilizzando il comando  $SENE$  del codice  $ANSYS$ ), il totale  $\overline{W}_1$  è ottenuto semplicemente dividendo  $E1$  per l'area di controllo (Fig. 2).

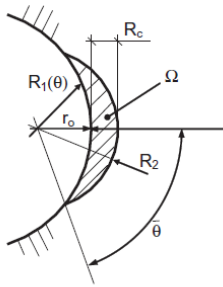


Fig. 2. Scheme of the control area  $\Omega$  for blunt notches [36].

$R_c$  è assunto costante e pari a 0,1 mm in tutti i modelli FE.

Questo valore di  $R_c$  permette il controllo del volume ( $\Omega$ ) per contenere solo l'angolo curvilineo dell'intaglio, senza eccedere ai fianchi rettilinei [30].

Sotto questa ipotesi, Eq. (1) è sempre applicabile.

Una volta che il  $SED$  sul volume di controllo viene valutato mediante analisi  $FE$  con mesh grossolane, lo sforzo massimo in corrispondenza dell'apice dell'intaglio può essere calcolato dall'equazione (1) semplicemente invertendo:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{\overline{W}_3}{F(2\alpha) \times H\left(2\alpha, \frac{R_c}{\rho}\right)}} \quad (2)$$

Infine, si può calcolare il fattore di concentrazione delle tensioni *SCF* come segue:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (3)$$

In Eq. (3),  $\sigma_n$  è la tensione nominale normale riferita all'area netta della sezione trasversale.

### 3.2 FLESSIONE

Le stesse equazioni utilizzate per la trazione possono essere utilizzate anche per la valutazione dello sforzo massimo in corrispondenza dell'apice dell'intaglio nel caso di flessione. La tensione nominale è di nuovo  $\sigma_n$  con riferimento all'area della sezione trasversale. L' Eq. (3) viene applicata per il calcolo del *SCF*.

### 3.3 TORSIONE

Nel caso di torsione, in analogia al carico di modo I, l'energia media su un volume di controllo può essere determinata come segue:

$$\overline{W}_3 = H \left( 2\alpha, \frac{R_c}{\rho} \right) \times \frac{\tau_{max}^2}{2G} \quad (4)$$

dove la funzione H per i due casi di  $2\alpha=0^\circ$  e  $60^\circ$ , è stata determinata con gli elementi finiti per maglie fini (vedi rif. [36]).

Il modulo di elasticità tangenziale G è assunto costante e pari a 79GPa.

Una volta noto il *SED* di un modello *FE* con una mesh grossolana, è possibile valutare lo sforzo massimo in corrispondenza dell'apice dell'intaglio invertendo l'Eq. (4):

$$\tau_{max} = \sqrt{\frac{2G\bar{W}_3}{H\left(2\alpha, \frac{Rc}{\rho}\right)}} \quad (5)$$

Infine, la *SCF* può essere calcolata:

$$K_t = \frac{\tau_{max}}{\tau_n} \quad (6)$$

In Eq. (6)  $\tau_n$  è la tensione nominale normale riferita all'area netta della sezione trasversale.

#### 4. INTAGLI PERIODICI

La prima semplice equazione per la valutazione del SCF in un modello con intagli periodici utilizzando un singolo intaglio equivalente con una profondità ridotta, è stata proposta in rif. [12] (vedi Fig. 3).

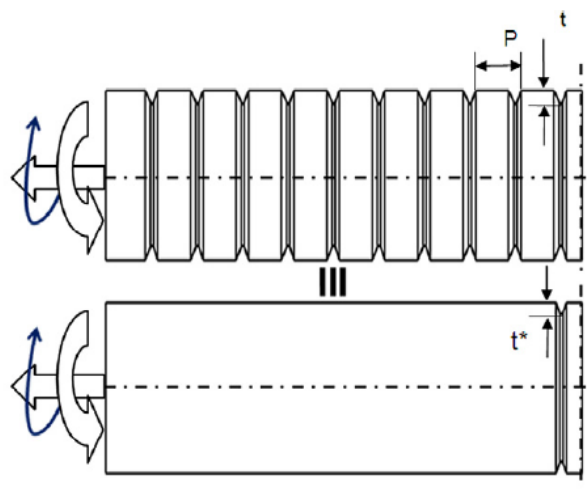


Fig. 3. Equality of periodic and single notches.

Secondo l'equazione sottostante, il fattore di quantificazione della profondità  $\gamma$ , dipende solo dalla frequenza di periodicità dell'intaglio  $t/P$  e può essere espressa come segue [12]:

$$\gamma = \frac{P}{\pi t} \tanh\left(\frac{\pi t}{P}\right) \quad (7)$$

In un recente studio basato sulla *BEM*, l'Eq. (7) è stata corretta, come suggerito in [18], con un fattore  $k=3$  in modo da estendere la gamma di applicabilità a qualsiasi valore di acutezza dell'intaglio. Infatti, la formula proposta in [12], è valida solo per intagli con raggio all'apice prossimo a zero e quindi, con rapporto  $\rho/t=0$ . D'altra parte, sono state considerate molteplici geometrie, in rif. [18], variando i principali parametri geometrici: a partire da intagli più profondi a quelli più superficiali. E' stata considerata anche una variazione dell'acutezza dell'intaglio. L'equazione precedente assume la seguente forma generale:

$$\gamma = \frac{P}{k\pi t} \tanh\left(\frac{k\pi t}{P}\right) \quad (8)$$

Il fattore di profondità ridotta in caso di sforzo normale è poi [18]:

$$\gamma = \frac{P}{3\pi t} \tanh\left(\frac{3\pi t}{P}\right) \quad (9)$$

In una più recente indagine degli stessi autori [19], è stato considerato il caso di una barra soggetta a torsione, indebolita da intaglio periodico a U. E' stato utilizzato il *BEM*, in combinazione con un'analogia termica, per valutare i *SCF* e poi il fattore di riduzione della profondità d'intaglio. Per una forma ideale degli intagli, è stato trovato un buon accordo con una struttura analitica proposta in [12]. Tuttavia, considerando una molteplicità di intagli arrotondati, è stato trovato un nuovo fattore di riduzione  $k=2$ , più adatto per una valutazione precisa dei *SCF*[19]. Trattare con singolo intaglio, alcune equazioni date in [15] e [13,46] (vedi Appendice A), forniscono i valori dei *SCF* in funzione dell'angolo di apertura, della profondità relativa  $t/d$  e dell'acutezza  $\rho/t$  dell'intaglio.



Le equazioni assumono la seguente forma generale:

$$K_t = F(2\alpha, t/d, \rho/t) \quad (10)$$

Vale la pena notare che l'equazione proposta in [15] è sensibile ad una variazione dell'angolo di apertura dell'intaglio, mentre la cornice proposta in Refs. [13,46] è indipendente da  $2\alpha$ . Allo scopo di valutare il *SCF*, la stessa procedura viene adottata in rif. [18]. Innanzitutto, per ogni configurazione di intaglio periodico,  $\gamma$  è calcolato in base alla frequenza relativa dell'intaglio  $t/P$  utilizzando l'eq. (7) e (9), proposta in [18]. Successivamente, per ciascun caso, la profondità ridotta  $t^*$  è stata valutata come segue:

$$t^* = \gamma t \quad (11)$$

Infine, secondo le equazioni presentate in [15] e [13,46], sono stati valutati i valori dei *SCF*.

L' Eq. (11) viene utilizzata aggiornando i rapporti  $\frac{\rho}{t^*}$  e  $\frac{t^*}{d}$ , tenendo conto anche della profondità ridotta  $t^*$ .

## **5. CONVALIDA DELLE EQUAZIONI DISPONIBILI PER SINGOLI INTAGLI E PRECISIONE DEL *SED* CON MESH GROSSOLANE**

Prima di procedere con la modellazione di configurazioni a intagli multipli, è stato considerato il caso di un singolo intaglio con due angoli di apertura  $2\alpha=0^\circ$  e  $2\alpha=60^\circ$ , per diversi valori di acutezza dell'intaglio stesso. Nella Tabella 1, sono presentate le relative deviazioni tra i valori *SED* ottenuti tramite modelli *FE* utilizzando mesh relativamente grossolane ed altre equazioni disponibili in letteratura per i due casi di angolo di apertura dell'intaglio. Un esempio di mesh grossolana utilizzato per la valutazione del *SED* è mostrato in Fig. 4.

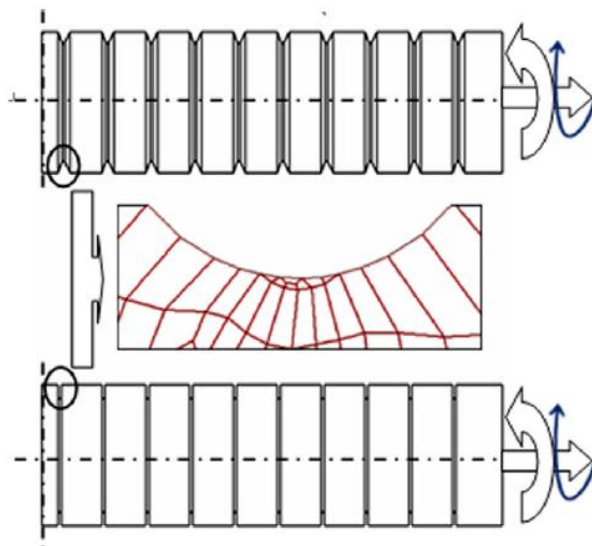


Fig. 4. The symmetric model of periodic notches with different opening angles.

Viene utilizzato un valore massimo di 6-7 elementi del volume di controllo per valutare il *SED*, mentre l'intero modello è costituito da circa 70 elementi. E' stata trovata una buona analogia tra *SCF* a base dell'approccio *SED* (con mesh grossolane) e il calcolo diretto dei *SCF* con maglie molto raffinate (circa 2000elementi). Il confronto con le equazioni fornite in Refs. [13,15] mostra che l'errore relativo è inferiore al 5% per ogni configurazione di intaglio considerata, confermando la precisione delle valide equazioni per singolo intaglio. Inoltre, sono state applicate densità di maglie differenti per confermare la versatilità dell'approccio *SED* considerando sia un unico intaglio, come illustrato nella Tabella 1, che intagli periodici.

**Table 1**  
Relative deviations between SED-based results and data from the literature (single notch with  $2\alpha = 60^\circ$ ). Comparison between coarse and fine mesh for narrow and wide spacing.

$\rho/t$	$K_t$ (FE)	$K_t$ (SED)	$K_t$ (NO) [13]	$K_t$ (NE) [12]	$K_t$ (KA) [11]	$\Delta\%$ (SED-NO)	$\Delta\%$ (SED-NE)	$\Delta\%$ (SED-KA)
0.20	5.10	5.03	4.85	4.62	4.89	3.69	8.97	2.79
0.40	3.64	3.64	3.61	3.45	3.65	0.82	5.22	-0.27
0.60	3.07	3.07	3.07	2.93	3.10	-0.15	4.69	-0.90
0.80	2.75	2.75	2.89	2.76	2.77	-5.12	-0.51	-0.80
1.00	2.53	2.53	2.53	2.41	2.55	-0.07	4.82	-0.64
No. of elements (inside the $\Omega$ )			$K_t$ (SED)		$\Delta\%$		$K_t$ (SED)	$\Delta\%$
			Wide spacing ( $t/P = 0.2$ , $\rho/t = 0.2$ )			Narrow spacing ( $t/P = 0.6$ , $\rho/t = 0.4$ )		
8			4.1190		-0.05	2.1193		-0.05
31			4.1209		0.00	2.1203		-0.01
60			4.1211		0.00	2.1204		0.00
109			4.1211		0.00	2.1205		0.00

Per il caso di intagli periodici, sono state esaminati diversi valori di inclinazione, mostrando l'efficacia del metodo nel caso in cui lo spazio fra gli intagli è ridotto, portando alla non linearità geometrica del modello.

## 6. UNA NUOVA PROPOSTA PER IL FATTORE DI RIDUZIONE DELLA PROFONDITA' D'INTAGLIO SULLA BASE DEL *SED*

Il valore ottimale del fattore  $k$  in Eq. (8) è stata valutato minimizzando la deviazione relativa tra i risultati ottenuti tramite analisi *FE* di intagli periodici e quelli dall'applicazione Eq. (8), usata in combinazione con le equazioni riportate in [15] per singolo intaglio. La stessa procedura adottata per mezzo del *BEM* [18] viene usata col metodo *FE*. L'ottimizzazione del processo è stata realizzata mediante la versione free del Pacchetto *CURVEEXPERT*. Il coefficiente  $k$  è risultato pari a 3,03 sia per tensione che per flessione e pari a 1,70 per il carico di torsione. Vale la pena notare che gli stessi valori di  $k$  sono stati ottenuti anche confrontando direttamente i risultati agli elementi finiti del *SED* in intagli periodici, con quelli ottenuti direttamente valutando il *SED* nell'equivalente singolo intaglio, sia con mesh fine che grossolana. I risultati sono in buon accordo con quelli riportati in Refs. [18,19], dove è stato proposto  $k=3$  per la tensione, mentre  $K=2$  per torsione (intagli longitudinali poco profondi) [18,19]. Trattare con carico di torsione, la deviazione maggiore del coefficiente  $k$  ottenuto dal *FEM* rispetto a quella ottenuta *BEM* [19], può essere spiegata come la minore sensibilità dei *SCF* sull'equivalente profondità di intaglio rispetto al caso carico di trazione, dove una piccola variazione di  $t$  induce grandi variazioni di  $K_t$ . Inoltre, mediante lo stesso processo di ottimizzazione usato nella [18] per l'equazione generalizzata in [18], è stata proposta una nuova espressione per  $\gamma$ , in base ai risultati *SED*. Nella nuova equazione, il fattore di riduzione della profondità di intaglio assume la forma seguente:

$$\gamma = a - be^{-c\left(\frac{t}{p}\right)^d}$$

I parametri  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  sono stati calcolati per assicurare una deviazione media sempre entro il limite del 5% tra i *SCFs* ottenuti utilizzando l'Eq. (12) e l'equazione per singolo intaglio data in [15]. I valori sono stati confrontati con quelli che sono direttamente derivati dall'approccio *SED* applicato con mesh grossolana su intagli periodici.

Gli stessi risultati sono stati confermati poi confrontando i risultati agli elementi finiti ottenuti col metodo *SED* per intagli periodici, con quelli direttamente ottenuti valutando il *SED* in un intaglio singolo equivalente, entrambi con maglie fini e grossolane.

I parametri introdotti in Eq. (12) per il caso di tensione, flessione e torsione sono elencati nella Tabella 2.

**Table 2**  
Coefficients for the cases of normal and torsion loading in Eq. (12).

$\gamma = a - be^{-c(\frac{r}{R})^d}$	
Normal stress (tension and bending)	Torsion
$a = 0.9900495$	$a = 0.98534753$
$b = 0.9589001$	$b = 0.97106507$
$c = 0.0568707$	$c = 0.15985867$
$d = -1.6195059$	$d = -1.48472198$

## 7. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questa sezione, sono riassunti i risultati dei modelli agli elementi finiti ed il confronto con i valori teorici riscontrati nei quattro modelli geometrici con diverse configurazioni di carico. Sono stati considerati due diversi valori dell'angolo di apertura  $2\alpha=0^\circ$  e  $2\alpha=60^\circ$ . La Fig.4 mostra l'intaglio medio e la tipica maglia adottata, utilizzata poi per la valutazione del *SED*. L'approccio applicato è sempre stato *SED*, adottando una mesh free e molto grossolana, essendo pari 7 il numero massimo di elementi all'interno del volume di controllo. Per le lastre piane, indebolite da intagli singoli e periodici, è stato utilizzato rispettivamente un massimo grado di raffinatura, corrispondente a 70 e 300 elementi. Sono stati ottenuti risultati molto vicini, nell'intervallo  $\pm 1\%$ , utilizzando solo due elementi all'interno del volume di controllo. Per confermare la versatilità dell'approccio *SED* e controllare i risultati in termini di densità di mesh, è stato effettuato un ampio confronto tra l'utilizzo di mesh fini e grossolane per diversi rapporti geometrici. Nei modelli *FE* raffinati, che consistevano più di 2000 elementi, i *SCF* sono stati valutati direttamente come la massima tensione all'apice dell'intaglio. Le differenze, in termini di  $K_t$ , sono sempre state inferiori al 2% (vedi Tabella 1). Vale la pena notare che, mentre per le soluzioni analitiche di singoli intagli, sono disponibili tutti i valori di *SCF* nelle tabelle 3-6. I dati mancanti per il *SED* che si riferiscono a intagli multipli, sono dovuti alle limitazioni geometriche date dai valori di passo, che non permettono di modellare ogni configurazione di intaglio periodico.

**Table 3**

Comparison of  $K_I$  by SED approach with FE results, the present model and SCFs obtained by using equations in [12,18] in a wide range of notch acuity, frequency of periodic notch and two opening angles: the case of symmetric model under tension.

$t/P$	$\rho/t$	$K_I$ (SED-0)	$K_I$ (SED-60)	$K_I$ (NO-NE) [13,12]	$K_I$ (NO-DR) [13,18]	$K_I$ (KA-DR) ( $2\alpha = 0^\circ$ ) [15,18]	$K_I$ (KA-DR) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,18]	$K_I$ (PM)	$\Delta\%$ (KA-DR& SED)	$\Delta\%$ (PM&SED)
0.01	0.20	4.82	4.81	4.81	4.80	4.90	4.90	4.88	1.87	1.46
	0.40	3.68	3.62	3.59	3.59	3.65	3.64	3.64	0.55	0.55
	1.00	2.58	2.63	2.54	2.53	2.54	2.54	2.54	-3.42	-3.42
	2.00		1.99	2.01	2.01	2.00	2.00	2.00	0.50	0.50
0.2	0.20	4.56	4.31	4.65	3.94	3.98	3.98	4.08	-7.66	-5.34
	0.40	3.14	3.12	3.49	3.01	3.03	3.03	3.10	-2.88	-0.64
	1.00	2.18	2.19	2.48	2.21	2.20	2.20	2.24	0.46	2.28
	2.00		1.73	1.98	1.82	1.79	1.79	1.81	3.47	4.62
0.4	0.20	3.27	3.26	4.31	3.21	3.23	3.23	3.14	-0.92	-3.68
	0.80	1.89	1.93	2.53	2.04	2.03	2.03	1.99	5.18	3.11
	1.00	1.75	1.76	2.35	1.92	1.91	1.91	1.88	8.52	6.82
0.6	0.20	2.80	2.81	3.94	2.84	2.83	2.83	2.68	0.71	-4.63
	0.40	2.10	2.14	3.01	2.26	2.25	2.25	2.15	5.14	0.47
	0.80	1.66		2.38	1.87	1.85	1.85	1.78	11.45	7.23
0.8	0.20	2.46		3.64	2.60	2.59	2.59	2.42	5.28	-1.63
	0.40	1.89		2.81	2.10	2.09	2.09	1.98	10.58	4.76
	0.60	1.64		2.46	1.88	1.87	1.87	1.78	14.02	8.54
1.0	0.20	2.26		3.40	2.43	2.42	2.42	2.26	7.08	0.00
	0.40	1.76		2.66	1.98	1.97	1.97	1.87	11.93	6.25
1.2	0.20	2.16		3.21	2.30	2.29	2.29	2.16	6.02	0.00
	0.40	1.69		2.53	1.90	1.89	1.89	1.79	11.83	5.92
1.4	0.2	2.11		3.06	2.20	2.20	2.20	2.08	4.27	-1.42
1.6	0.2	2.12		2.94	2.12	2.12	2.12	2.03	0.00	-4.25
1.8	0.2	2.15		2.84	2.06	2.05	2.05	1.98	-4.65	-7.91
2.0	0.2	2.20		2.75	2.00	2.00	2.00	1.95	-9.09	-11.36

Abbreviations: NE: Neuber's Eq. [12], NO: Noda's Eqs. [13,46], KA: Kato's Eqs. [15], DR: Dragoni Eqs. [18,19], PM: Present Model.

**Table 4**

Comparison of  $K_I$  by SED approach with FE results, the predicted model and SCFs by using equations in [12,18] in a wide range of notch acuity, frequency of periodic notch and two opening angles: the case of axis-symmetric model under tension.

$t/P$	$\rho/t$	$K_I$ (SED-0)	$K_I$ (SED-60)	$K_I$ (NO-NE) [46,12]	$K_I$ (NO-DR) [46,18]	$K_I$ (KA-NE) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,12]	$K_I$ (KA-DR) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,18]	$K_I$ (PM)	$\Delta\%$ (KA-DR&SED)	$\Delta\%$ (PM&SED)
0.01	0.20	4.48	4.53	4.35	4.35	4.51	4.51	4.50	-0.44	-0.66
	0.40	3.32	3.17	3.24	3.23	3.35	3.35	3.34	5.68	5.36
	1.00	2.41	2.32	2.26	2.26	2.33	2.33	2.32	0.43	0.00
	2.00		1.86	1.79	1.79	1.83	1.83	1.82	-1.61	-2.15
0.2	0.20	4.08	4.12	4.26	3.76	4.39	3.80	3.88	-7.77	-5.83
	0.40	3.03	3.04	3.17	2.86	3.27	2.89	2.94	-4.93	-3.29
	1.00	2.11	2.12	2.23	2.08	2.29	2.09	2.12	-1.42	0.00
	2.00		1.68	1.77	1.69	1.81	1.70	1.71	1.19	1.79
0.4	0.20	3.15	3.21	4.02	3.14	4.11	3.14	3.06	-2.18	-4.67
	0.80	1.88	1.86	2.34	1.99	2.38	1.97	1.94	5.91	4.30
	1.00	1.75	1.73	2.16	1.87	2.20	1.85	1.82	6.94	5.20
0.6	0.20	2.62	2.79	3.76	2.80	3.80	2.78	2.64	-0.36	-5.38
	0.40	2.12	2.12	2.86	2.23	2.89	2.21	2.12	4.25	0.00
	0.80	1.67		2.24	1.83	2.25	1.82	1.75	8.98	4.79
0.8	0.20	2.43		3.51	2.57	3.53	2.55	2.39	4.94	-1.65
	0.40	1.90		2.70	2.07	2.71	2.06	1.95	8.42	2.63
	0.60	1.68		2.35	1.86	2.35	1.84	1.76	9.52	4.76
1.0	0.20	2.29		3.31	2.41	3.32	2.39	2.24	4.37	-2.18
	0.40	1.77		2.58	1.96	2.57	1.95	1.85	10.17	4.52
1.2	0.20	2.09		3.14	2.28	3.14	2.27	2.14	8.61	2.39
	0.40	1.65		2.47	1.88	2.45	1.87	1.78	13.33	7.88
1.4	0.2	1.99		3.01	2.19	3.00	2.18	2.07	9.55	4.02
1.6	0.2	1.93		2.89	2.11	2.88	2.10	2.01	8.81	4.15
1.8	0.2	1.94		2.80	2.04	2.78	2.04	1.97	5.15	1.55
2.0	0.2	1.95		2.71	1.99	2.69	1.98	1.94	1.54	-0.51

**Table 5**

Comparison of  $K_t$  by SED approach with FE results, the predicted model and SCFs by using equations given in [12,18] in a wide range of notch acuity, frequency of periodic notch and two opening angles: the case of axis-symmetric model under bending.

$t/P$	$\rho/t$	$K_t$ (SED-0)	$K_t$ (SED-60)	$K_t$ (NO-NE) [46,12]	$K_t$ (NO-DR) [46,18]	$K_t$ (KA-NE) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,12]	$K_t$ (KA-DR) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,18]	$K_t$ (PM)	$\Delta\%$ (KA-DR&SED)	$\Delta\%$ (PM&SED)
0.01	0.20	3.79	3.83	3.79	3.79	3.83	3.83	3.82	0.00	-0.26
	0.40	2.82	2.81	2.84	2.84	2.83	2.83	2.82	0.71	0.36
	1.00	2.02	1.98	2.01	2.01	1.98	1.98	1.97	0.00	-0.51
	2.00		1.61	1.61	1.61	1.58	1.58	1.58	-1.86	-1.86
0.2	0.20	3.67	3.70	3.73	3.39	3.76	3.40	3.46	-8.11	-6.49
	0.40	2.73	2.74	2.80	2.58	2.79	2.57	2.61	-6.20	-4.74
	1.00	1.92	1.93	1.99	1.87	1.96	1.86	1.88	-3.63	-2.59
	2.00		1.55	1.60	1.54	1.57	1.52	1.53	-1.94	-1.29
0.4	0.20	3.00	3.06	3.58	2.95	3.60	2.93	2.87	-4.25	-6.21
	0.80	1.80	1.78	2.09	1.84	2.07	1.83	1.81	2.81	1.69
	1.00	1.68	1.66	1.94	1.73	1.92	1.72	1.70	3.61	2.41
0.6	0.20	2.54	2.70	3.39	2.67	3.40	2.64	2.52	-2.22	-6.67
	0.40	2.06	2.06	2.58	2.12	2.57	2.10	2.02	1.94	-1.94
	0.80	1.68		2.02	1.73	3.40	1.70	1.67	3.61	2.41
0.8	0.20	2.37		3.22	2.48	3.22	2.45	2.31	3.38	-2.53
	0.40	1.86		2.47	1.99	2.46	1.97	1.88	5.91	1.08
	0.60	1.65		2.14	1.78	2.13	1.77	1.70	7.27	3.03
1.0	0.20	2.26		3.07	2.34	3.06	2.31	2.18	2.21	-3.54
	0.40	1.75		2.38	1.90	2.36	1.88	1.80	7.43	2.86
1.2	0.20	2.06		2.95	2.23	2.93	2.21	2.09	7.28	1.46
	0.40	1.63		2.30	1.83	2.28	1.82	1.74	11.66	6.75
1.4	0.2	1.94		2.84	2.14	2.72	2.12	2.02	9.28	4.12
1.6	0.2	1.85		2.75	2.07	2.72	2.05	1.97	10.81	6.49
1.8	0.2	1.81		2.67	2.01	2.64	2.00	1.94	10.50	7.18
2.0	0.2	1.78		2.60	1.96	2.57	1.95	1.91	9.55	7.30

**Table 6**

Comparison of  $K_t$  by SED approach with FE results, the predicted model and SCFs by using equations given in [12] and [19] in a wide range of notch acuity, frequency of periodic notch and two opening angles: the case of axis-symmetric model under torsion.

$t/P$	$\rho/t$	$K_t$ (SED-0)	$K_t$ (SED-60)	$K_t$ (NO-NE) [46,12]	$K_t$ (NO-DR) [46,19]	$K_t$ (KA-DR) ( $2\alpha = 0^\circ$ ) [15,19]	$K_t$ (KA-NE) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,12]	$K_t$ (KA-DR) ( $2\alpha = 60^\circ$ ) [15,19]	$K_t$ (PM)	$\Delta\%$ (KA-DR&SED)	$\Delta\%$ (PM&SED)
0.01	0.20	2.48	2.42	2.39	2.39	2.48	2.42	2.42	2.42	0.00	0.00
	0.40	1.93	1.92	1.91	1.91	1.94	1.93	1.93	1.93	0.52	0.52
	1.00	1.51	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	0.00	0.00
	2.00		1.30	1.29	1.29	1.28	1.28	1.28	1.28	-1.54	-1.54
0.2	0.20	2.46	2.40	2.35	2.27	2.33	2.39	2.30	2.36	-4.17	-1.67
	0.40	1.92	1.91	1.88	1.83	1.85	1.91	1.85	1.89	-3.14	-1.05
	1.00	1.48	1.48	1.48	1.45	1.45	1.48	1.45	1.47	-2.03	-0.68
	2.00		1.28	1.28	1.27	1.26	1.28	1.26	1.27	-1.56	-0.78
0.4	0.20	2.30	2.24	2.27	2.09	2.11	2.30	2.10	2.16	-6.25	-3.57
	0.80	1.44	1.44	1.53	1.46	1.45	1.53	1.45	1.48	0.69	2.78
	1.00	1.37	1.36	1.45	1.40	1.39	1.45	1.39	1.41	2.21	3.68
0.6	0.20	2.06	2.05	2.17	1.95	1.95	2.20	1.95	1.99	-4.88	-2.93
	0.40	1.63	1.62	1.77	1.63	1.62	1.78	1.62	1.65	0.00	1.85
	0.80	1.34		1.49	1.42	1.40	1.49	1.40	1.41	4.48	5.22
0.8	0.20	1.92		2.09	1.86	1.84	2.10	1.84	1.86	-4.17	-3.12
	0.40	1.51		1.72	1.57	1.55	1.72	1.55	1.56	2.65	3.31
	0.60	1.35		1.56	1.45	1.43	1.55	1.43	1.44	5.93	6.67
1.0	0.20	1.81		2.02	1.78	1.76	2.02	1.76	1.76	-2.76	-2.76
	0.40	1.43		1.67	1.52	1.50	1.66	1.50	1.50	4.90	4.90
1.2	0.20	1.69		1.95	1.72	1.70	1.95	1.70	1.68	0.59	-0.59
	0.40	1.36		1.63	1.49	1.46	1.62	1.46	1.45	7.35	6.62
1.4	0.2	1.61		1.90	1.67	1.65	1.89	1.65	1.62	2.48	0.62
1.6	0.2	1.54		1.86	1.63	1.61	1.84	1.61	1.58	4.55	2.60
1.8	0.2	1.49		1.82	1.60	1.58	1.80	1.58	1.54	6.04	3.36
2.0	0.2	1.46		1.78	1.57	1.55	1.76	1.55	1.51	6.16	3.42

## 7.1 MODELLO SIMMETRICO SOGGETTO A FLESSIONE

Sono presenti, nella Tabella 3, i risultati ottenuti mediante analisi FE di lastre piane simmetriche soggette a sollecitazioni di trazione, confrontati con i valori ottenuti utilizzando le diverse equazioni disponibili in letteratura. I valori dei *SCF* per i due angoli di apertura dell'intaglio sono stati stimati usando l'equazione riportata in [15], in combinazione con il fattore di riduzione nel caso di intagli periodici proposto in [18] (vedi Eq. (9)). I valori sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite *SED* con mesh grossolane. Il confronto mostra un stretto accordo con una deviazione relativa,  $\Delta$ , inferiore al 14% per tutti i casi considerati e in molti casi meno del 5%. Questi risultati confermano la proposta fatta in [18] per il fattore di riduzione di profondità dell'intaglio. E' anche interessante notare come l'effetto di apertura dell'angolo dell'intaglio varia a seconda della forma e della profondità dell'intaglio. In questo studio, la profondità dell'intaglio è considerata costante in tutti i casi, perciò l'unico parametro efficace è l'acutezza dell'intaglio. I risultati numerici ottenuti con mesh grossolane, riconvertiti in termini di *SCF*, sono stati confrontati con i risultati ottenuti utilizzando le equazioni per singolo intaglio date in [13], in combinazione con i fattori di riduzione della profondità secondo l'eq. (7) [12] e l'Eq. (9) [18]. Analizzando i risultati riportati nella Tabella 3, si può osservare che c'è un buon accordo tra l'approccio *SED* e le equazioni proposte in Refs. [13,15], entrambe applicando il fattore di riduzione proposto in [12,18] nel caso di piccoli rapporti profondità/passaggio  $t/P=0,01$ . Tuttavia, aumentando  $t/P$ , è evidente che si sovrastima a causa dall'utilizzo di Eq. (7).

La valutazione effettuata utilizzando la nuova equazione proposta per  $\gamma$  (Eq. (12)) con l'equazione fornita in [15] (o in alternativa con il *SED* applicato al singolo intaglio equivalente), produce una deviazione relativa  $\Delta$  entro il 6% (con la sola eccezione di pochi casi) rispetto ai valori *SCF* ottenuti direttamente mediante modellazione periodica di componenti intagliati con una mesh grossolana (che sono pari a quelli ottenuti utilizzando mesh molto raffinate). Le Fig. 5 e 6 mostrano il confronto tra approccio *SED* e le equazioni riportate in [13] per singoli intagli, attuando i fattori di riduzione di profondità secondo equazioni (7) e (9), nei due diverse frequenze di intagli periodici ( $t/P=0,2$  e  $0,4$ ).

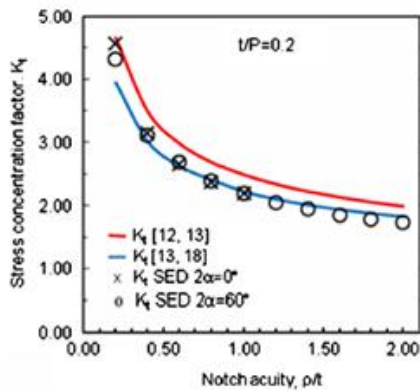


Fig. 5. The comparison of SED approach with the data given in [13] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of a symmetric plate under tension with  $t/P = 0.2$ .

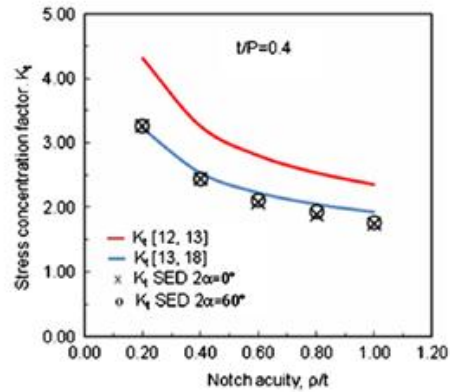


Fig. 6. The comparison of SED approach with the data given in [13] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of a symmetric plate under tension with  $t/P = 0.4$ .

E' evidente la sovrastima causata dall'applicazione dell'Eq. (7) [12] e, questa discrepanza, aumenta aumentando il rapporto  $t/P$  (vedi Fig. 5). Inoltre, si può osservare che, aumentando  $\rho/t$ , la differenza tra  $SCF$  valutati mediante l'approccio  $SED$  e i valori ottenuti utilizzando le equazioni date in [13] in combinazione con Eq. (9), aumenta. Queste discrepanze possono essere ridotte con l'introduzione della nuova espressione per  $\gamma$  Eq. (12), che assicura una maggiore precisione in modo tale da adattarsi ai dati numerici ottenuti utilizzando il metodo  $SED$ , per una più ampia molteplicità di acutezza dell'intaglio (vedi Tabella 3).

## 7.2 MODELLO AXIAL-SIMMETRICO SOGGETTO TRAZIONE

I risultati dei modelli agli elementi finiti di barre soggette a trazione assial-simmetriche ed il confronto con i valori previsti dalle diverse equazioni disponibili, sono mostrate in Tabella 4. Nella tabella sono elencati i risultati ottenuti implementando le equazioni contenute nel Refs. [13,15] utilizzate in combinazione con il fattore di riduzione secondo le Equazioni (7) e (9). Similmente ai modelli simmetrici sotto carico di trazione, può essere rilevato che, nel caso di piccole frequenze di intaglio periodico ( $t/P=0,01$ ), vi è una stretta concordanza tra i risultati  $SED$  e quelli ottenuti usando le equazioni in Refs. [13,15], entrambe applicando il fattore di riduzione fornito in Refs. [12,18]. Aumentando il rapporto  $t/P$ , c'è un'elevata sovrastima causata dall'applicazione dell' Eq. (7) [12]. L'errore massimo tra i risultati delle analisi agli elementi finiti  $SED$  e i valori di  $K_t$  calcolati dal fattore di riduzione suggerito in [18], è circa del 10%. Applicando l'Eq. (12) per la  $\gamma$ , la deviazione relativa in termini di  $K_t$  tra i



risultati attuali e i risultati numerici è entro il 5%. Nelle figure 7 e 8 sono rappresentati due casi, distinti da una diversa profondità di rapporto di passo  $t/P=0,2$  e  $0,4$ . Questo è utile per confrontare i risultati ottenuti dal metodo *SED* con i valori forniti dalle equazioni in [15] utilizzando insieme le espressioni per il fattore di riduzione dell'intaglio Eq. (7) e (9).

### 7.3 MODELLO AXIAL-SIMMETRICO SOGGETTO A FLESSIONE

Il confronto tra i risultati ottenuti mediante l'approccio *SED* con quelli disponibili nelle equazioni, sono elencati nella Tabella 5 per alberi soggetti a sollecitazioni di flessione. Simili ai casi precedenti, i risultati di due specifici rapporti profondità/passaggio ( $t/P=0,2$  e  $0,4$ ) sono riportati nelle Fig. 9 e 10 per confrontare i valori numerici, sulla base del metodo *SED*, con quelli forniti dalle equazioni riportate in [15], utilizzando eq. (7) e (9) per  $\gamma$  [12,18].

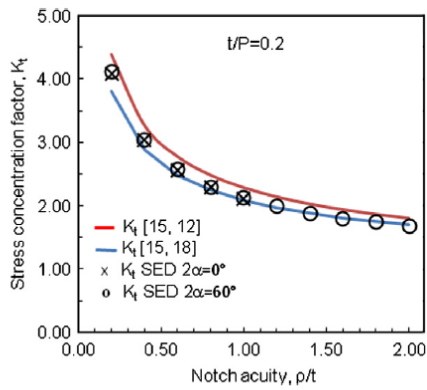


Fig. 7. The comparison of SED approach with the data given in [15] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of an axis-symmetric model under tension with  $t/P=0.2$ .

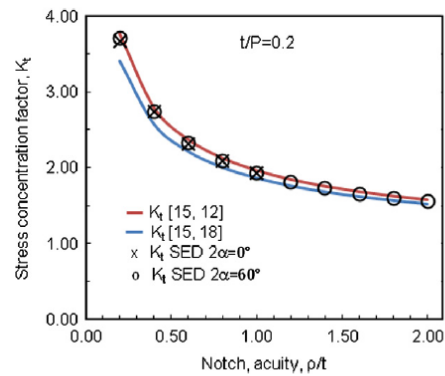


Fig. 9. The comparison of SED approach with the data given in [15] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of an axis-symmetric model under bending with  $t/P=0.2$ .

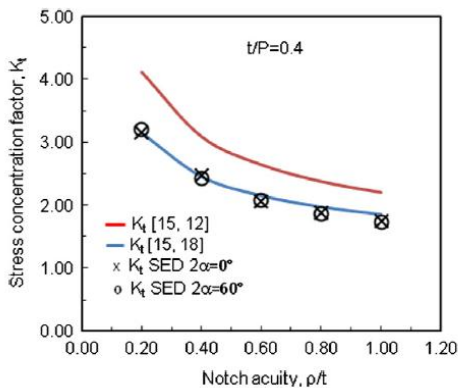


Fig. 8. The comparison of SED approach with the data given in [15] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of an axis-symmetric model under tension with  $t/P=0.4$ .

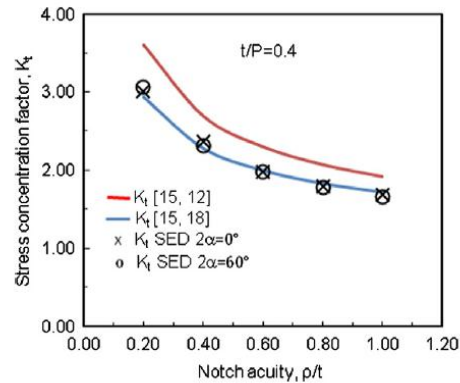


Fig. 10. The comparison of SED approach with the data given in [15] and implementing proposed depth reduction factors in [12,18] in the case of an axis-symmetric model under bending with  $t/P=0.4$ .

Nel caso di un modello assial-simmetrico soggetto a flessione, per piccole frequenze di intaglio periodico ( $t/P=0,01$ ), vi è un buon accordo tra l'approccio *SED* ed i valori ottenuti dall'applicazione delle equazioni per singoli intagli, si possono osservare in tabella 5, secondo Refs. [13,15] o applicando Eq. (7) e (9) per  $\gamma$ . Aumentando la frequenza di periodicità dell'intaglio ( $t/P$ ), questo porta ad un maggiore aumento dei valori *SCF*, dovuto alla sovrastima causata dalla riduzione del fattore proposto in [12] (vedi fig. 10). La deviazione massima tra *SCF* ottenuti con il metodo *SED* ed i valori ottenuti applicando il fattore di riduzione [18] è circa del 12%, confermando così la validità della recente proposta [18]. La nuova espressione per  $\gamma$  assicura una deviazione massima relativa inferiore al 6% e in molti casi meno del 3% se confrontati con i risultati dell'approccio *SED*. Questo vale per una vasta molteplicità di acutezze dell'intaglio.

#### **7.4 MODELLO ASSIAL-SIMMETRICO SOGGETTO A TORSIONE**

Il contributo principale allo studio analitico di alberi intagliati sotto torsione è stato dato in rif. [12], dove è stata determinato il *SCF* di alberi indeboliti da intagli circonferenziali sia profondi che superficiali. In [47], un'accurata analisi dimostra che la soluzione in [12], deriva da bassi valori del *SCF* quando viene applicata a profonde scanalature con piccoli raggi alla base. In rif. [48], i risultati forniti in [47] sono stati pienamente confermati, mentre in [49] è stata presentata una generale tecnica numerica utilizzando funzioni di spostamento di *Neuber-Papkovich*. Molto più recentemente, vengono analizzati i *SCF* di un albero con intagli arrotondati a *V* soggetto a torsione mediante il metodo della forze, con una serie di formule utili per determinare il teorico *SCF* per qualsiasi dimensione dell'intaglio [46]; questa formula riduce l'errore di un di 1% in meno rispetto ai risultati numerici. E' stata recentemente sviluppata una nuova struttura analitica per la creazione di un legame tra il fattore di intensificazione delle tensioni e la tensione massima di taglio sull'apice dell'intaglio[50]. Le espressioni proposte in rif. [46] sono state utilizzate per la presenza di singoli intagli a torsione, essendo queste classiche equazioni ben consolidate e utilizzate dalla comunità scientifica. Vale la pena notare che gli stessi risultati possono essere ottenuti utilizzando le nuove equazioni riportate in [50], con uno scarto massimo entro l'1% rispetto alle

equazioni date in [46]. I risultati per barre assial-simmetriche, indebolite da intagli periodici e soggette a torsione, sono elencati nella Tabella 6. La tabella presenta il confronto tra i risultati ottenuti con i modelli *SED* e quelli ottenuti combinando le diverse equazioni tratte dalla letteratura. In un caso, è stato scelto un rapporto profondità/passaggio uguale a 0,4, per confrontare i risultati *FE* con i risultati della soluzione data in [15], considerando l'equivalente fattore di riduzione dell'intaglio fornito in [19] (vedi Fig.11). Nel caso di un minor rapporto tra profondità e passo ( $t/P=0,2$ ), i dati determinati col *SED*, quasi coincidono con l'equazione presentata in [15], utilizzata in combinazione con le espressioni di  $\gamma$  riportate in [12] e [19]. L'effetto della sollecitazione di torsione sul *SCF* è diverso rispetto ai casi sollecitazioni di trazione flessione. Contrariamente ai casi precedenti, i dati della Tabella 6 mostrano chiaramente che l'uso del fattore di riduzione proposto in [12] è vicino all'utilizzo dell'equazione recente  $\gamma$  [19]. Sebbene la deviazione fra l'equazione fornita in [12] e l'equazione data in [19] aumenta aumentando il rapporto  $t/P$ , nel caso di torsione questo aumento è molto limitato. Come detto sopra, trattare con carico torsione, vi è una bassa sensibilità dei *SCF* sulla profondità dell'intaglio equivalente rispetto al caso di trazione, in cui una piccola variazione di  $t$  induce una grande variazioni di  $K_t$ . In accordo con le sollecitazioni di trazione e flessione, l'effetto di considerare gli angoli di apertura dell'intaglio con le equazioni date in [15], è stato ritenuto trascurabile. Il fattore di riduzione secondo Eq. (12) fornisce un errore massimo inferiore al 5% confrontando i valori ed i risultati ottenuti direttamente dalla modellazione *FE*.

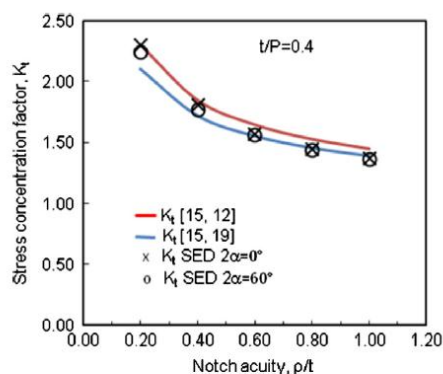


Fig. 11. The comparison of SED approach with the data given in [15] and implementing proposed depth reduction factors in [12,19] in the case of an axis-symmetric model under torsion with  $t/P = 0.4$ .

## 8. CONCLUSIONI

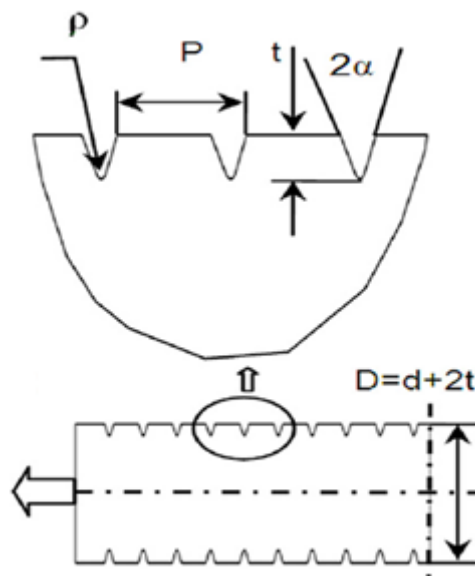
Usando il metodo *SED* in diversi modelli *FE*, è stato calcolato il *SCF* di lastre piane e tondi indeboliti da intagli di tipo periodico a V e U sottoposti a sollecitazioni di trazione, flessione e torsione. Secondo la formula di *Neuber*, il *SCF* nel caso di intagli periodici, può essere valutato considerando un unico intaglio caratterizzato dalla stessa forma, ma con una profondità ridotta. Sono stati documentati e confrontati i fattori di riduzione di profondità proposti in passato da *Neuber* e recentemente rivisti da altri autori con le relative deviazioni, mostrando la validità delle recenti proposte sia per sforzo normale che per torsione. D'altra parte, l'equazione di *Neuber* è caratterizzata da una tendenza di sovrastima particolarmente evidente aumentando il rapporto  $t/P$ . Il vantaggio unico del metodo *SED* sta nell'uso di una maglia grossolana nei modelli *FE*: questa è l'applicazione più importante di tale tecnica nel presente studio. Si è dimostrato che i calcoli basati sul *SED* all'apice dell'intaglio, sono sufficientemente accurati per stimare i *SCF* rilevanti nel caso di intagli periodici in lastre piane e barre tonde in condizioni di sollecitazioni di sforzi normali (trazione e flessione) e torsione. Di conseguenza, viene proposto un nuovo fattore di riduzione della profondità d'intaglio basato sul *SED*, che è abbastanza preciso per qualsiasi valore di acutezza dell'intaglio. Il metodo basato su *SED* con mesh grossolane può essere facilmente esteso a componenti reali tridimensionali indeboliti da intagli periodici.

# 1. MODELLI 3-D PER PIASTRE SOGGETTE A MODO I IN PRESENZA DI INTAGLI PERIODICI

Mediante l'utilizzo del software agli elementi finiti *ANSYS* si sono studiati gli effetti tridimensionali in componenti piani in presenza di intagli periodici. In particolar modo, per componenti piani s'intendono delle piastre nelle quali vi è la presenza di una schiera di intagli. Le piastre vengono sollecitate con un carico di trazione di puro modo I. Gli intagli presenti nelle piastre hanno una loro geometria, definita dai seguenti parametri geometrici principali:

- raggio all'apice dell'intaglio  $\rho$ ;
- angolo di apertura  $2\alpha$ ;
- passo tra un intaglio e il successivo  $p$ ;
- profondità dell'intaglio  $t$ .

La figura sottostante schematizza le principali dimensioni geometriche che caratterizzano l'intaglio, rappresentando una piastra soggetta ad un carico di trazione in presenza di intagli periodici.



Tutte le geometrie analizzate, ad esclusione di quelle con il raggio all'apice dell'intaglio pari a zero, presentano i seguenti rapporti geometrici:

$$\frac{\rho}{t} = 0,2$$

$$\frac{t}{p} = 0,2$$

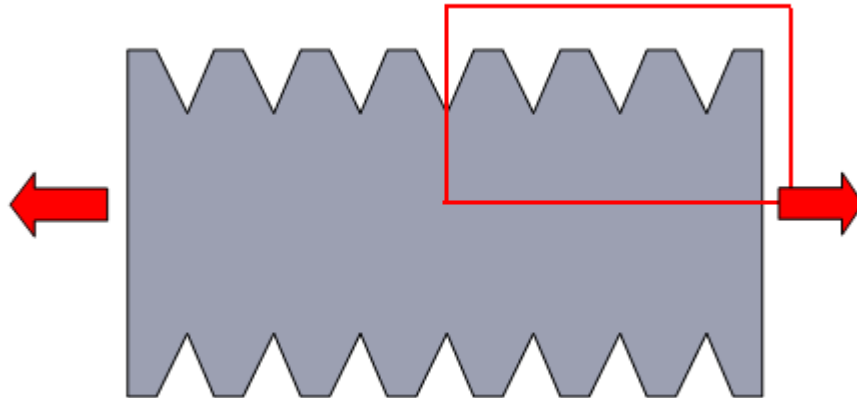
Si tratta quindi, di studiare la distribuzione delle tensioni all'apice dell'intaglio posizionato nella mezziera della schiera di intagli per differenti geometrie di piastra, cambiando opportunamente le principali dimensioni geometriche come il raggio all'apice dell'intaglio, l'angolo di apertura dell'intaglio e lo spessore della piastra.

La tabella sottostante riassume tutte le piastre modellate e analizzate mediante il software agli elementi finiti *ANSYS*, cambiando rispettivamente le principali dimensioni geometriche.

	$2\alpha$	$\rho$ [mm]	$p$ [mm]	$t$ [mm]	Spessore1 [mm]	Spessore2 [mm]	Spessore3 [mm]	Spessore4 [mm]
MODELLO 1	60°	0.1	2.5	0.5	10	5	2	1
MODELLO 2	60°	1	25	5	10	5	2	1
MODELLO 3	120°	0.1	2.5	0.5	10	5	2	1
MODELLO 4	120°	1	25	5	10	5	2	1
MODELLO 5	60°	0	2.5	0.5	10	5	2	1
MODELLO 6	120°	0	2.5	0.5	10	5	2	1

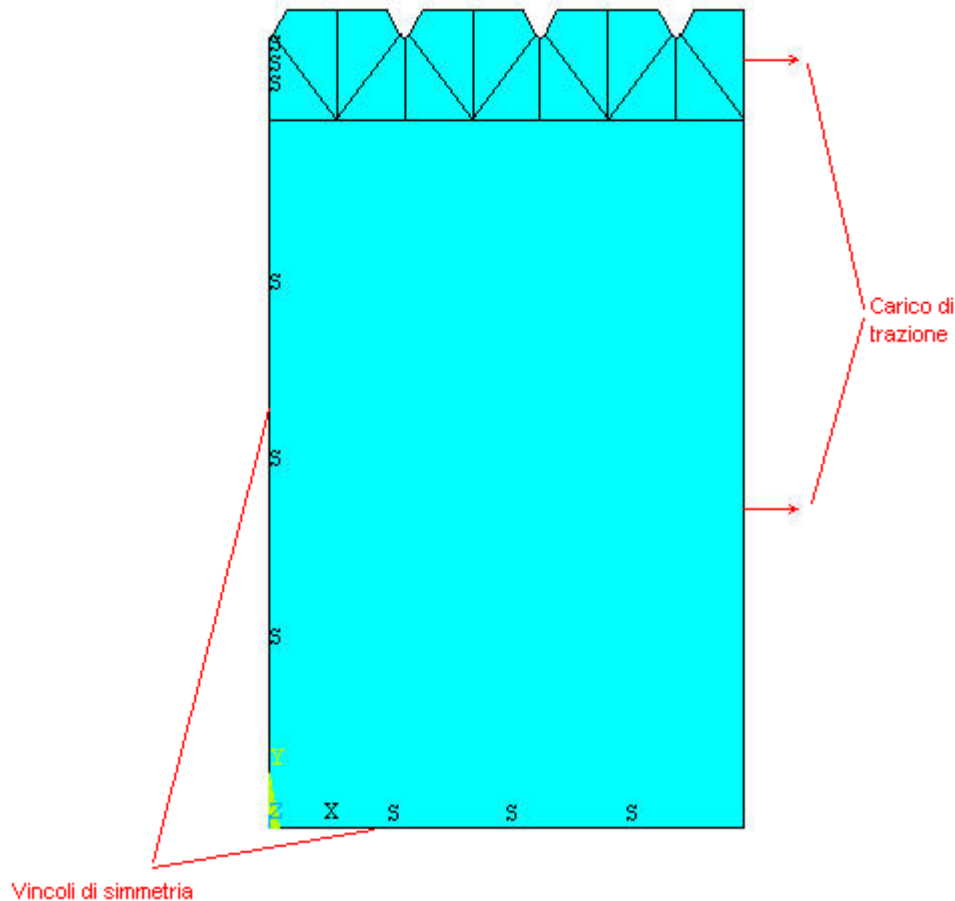
## 1.1 CREAZIONE DEL MODELLO 3-D IN ANSYS

Mediante il software agli elementi finiti *ANSYS*, si modellano le geometrie delle varie piastre riassunte nella precedente tabella, iniziando con la creazione della geometria piana 2-D. Il materiale viene assunto isotropo, con modulo elastico  $E=206.000\text{MPa}$  e rapporto di Poisson  $\nu=0.3$ . L'elemento più adatto per modellare superfici piane è il *PLANE 82* con opzione di *Plain strain*. Si considera un numero iniziale di intagli presenti sulle piastre analizzate pari a quattordici, ma il modello agli elementi finiti viene semplificato opportunamente modellando solamente  $\frac{1}{4}$  della geometria totale della piastra in quanto si sfrutta il concetto di simmetria. La figura sottostante presenta un modello generico di piastra soggetto a modo I e, la zona racchiusa nel perimetro in rosso, è il quarto di piastra considerato e modellato poi in *ANSYS*.



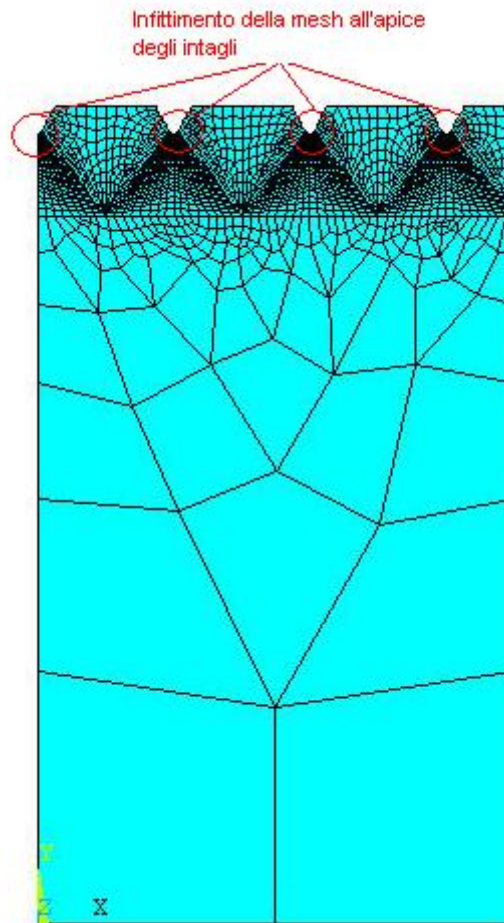
Si tratta adesso di applicare opportunamente carichi e vincoli in modo tale da riprodurre sulla piastra una sollecitazione di puro modo I. Un esempio di modello di piastra generico 2-D, completo di carichi e vincoli di simmetria modellato in *ANSYS*, è rappresentato nella figura sottostante: la figura presenta il quarto di piastra, la quale è soggetta ad un carico di trazione lungo la direzione dell'asse x, di modo I, impostato ad un valore pari a  $100\text{MPa}$  per tutti i modelli analizzati. Una volta impostato il carico di trazione, il comando "*Symmetry BC*" presente nel codice *ANSYS*, imposta automaticamente gli spostamenti da bloccare affinché sulla piastra ci sia puro modo I e, sul lato sinistro e quello

inferiore, i simboli “S” stanno ad indicare la presenza delle condizioni di simmetria. Volendo impostare manualmente i vincoli, si dovrebbe bloccare sul lato verticale a sinistra lo spostamento lungo X e sul lato inferiore lo spostamento lungo Y.



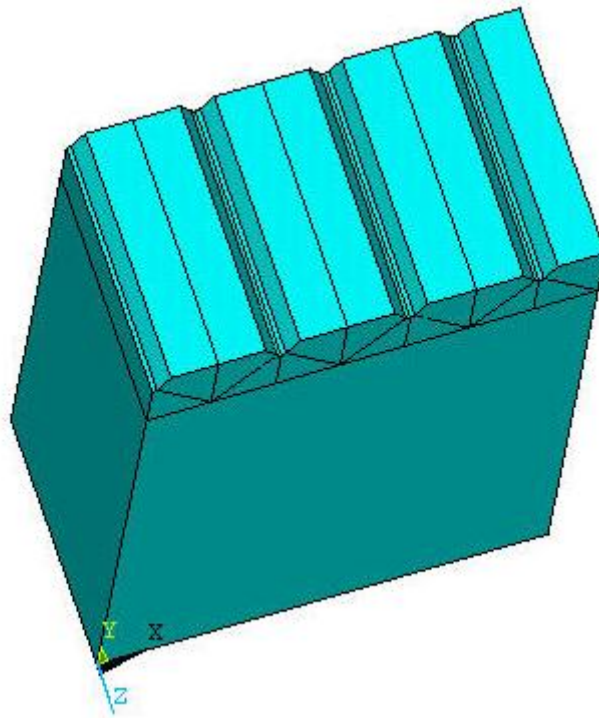
Successivamente viene fatta la mesh nel modello 2-D la quale è di tipo *mapped* ed infittita appositamente in prossimità dell'apice degli intagli, mentre sul resto della piastra è di tipo *free*. Siccome l'obiettivo principale è quello di plottare l'andamento delle tensioni all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, cioè per l'intaglio posizionato in mezzzeria della schiera, avere una mesh fine solo in prossimità dell'apice, fa sì di ottenere risultati più accurati e di non appesantire poi il modello 3-D, rendendo così più veloce la risoluzione. La figura sottostante mostra un modello generico evidenziando il tipo di mesh utilizzata: come si può vedere, la mesh va ad infittirsi sempre più in prossimità dell'apice degli intagli.





Successivamente, costruito il modello 2-D, viene aggiunto l'elemento *SOLID45* utilizzato per modellare geometrie 3-D e, tramite la funzione *Exstrude* presente in *ANSYS*, si estrude il modello 2-D lungo la direzione z, assegnando alla piastra un opportuno spessore fra quelli elencati in tabella ed una suddivisione lungo l'asse z. Il fatto di impostare il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione permette, come si vedrà nelle simulazioni svolte, di ottenere un andamento più regolare della tensione lungo lo spessore. Inoltre, il numero di suddivisioni sull'asse z, serve poi per definire il path lungo lo spessore all'apice dell'intaglio in corrispondenza dell'asse di simmetria: il path è stato fatto sul numero di nodi presenti lungo lo spessore che è funzione del numero di suddivisioni assegnato al momento dell'estrusione.

La mesh del modello 2-D viene ripetuta lungo lo spessore in funzione del numero di nodi impostato al momento dell'estrusione. Si ottiene così il seguente modello tridimensionale:



Al modello 3-D si impostano carichi e vincoli di simmetria analoghi al modello 2-D, solamente non più applicati alle linee perimetrali, ma alle superfici interessate.

## 1.2 OBIETTIVI

Gli obiettivi principali delle simulazioni svolte sono i seguenti:

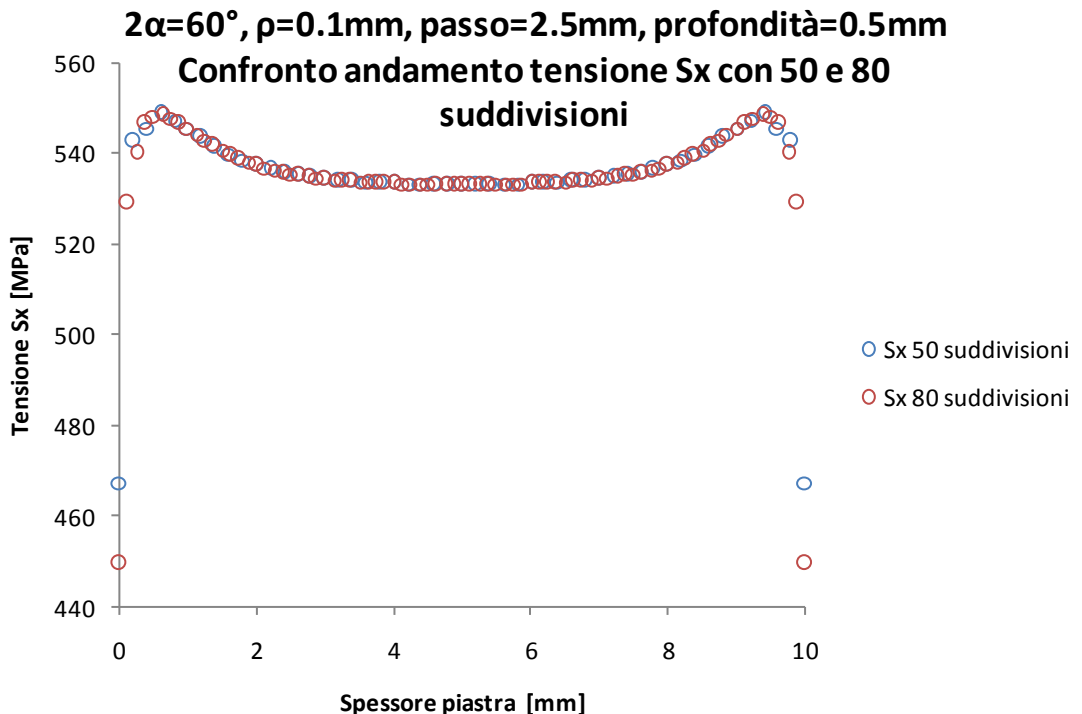
- plottare l'andamento della tensione  $S_x$  in corrispondenza dell'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria della piastra, per le geometrie aventi raggio all'apice dell'intaglio diverso da zero.
- Per i modelli aventi raggio all'apice dell'intaglio pari a zero, calcolare il fattore di intensificazione delle tensioni in funzione dello spessore, utilizzando la formula di Gross e Mendelson in due diverse direzioni:
  1. lungo lo spessore della piastra, a delle opportune distanze dall'apice dell'intaglio pari a 0.001, 0.01, 0.1, 0.2mm;
  2. lungo la direzione di propagazione dell'intaglio in determinati nodi lungo lo spessore.
- Per tutti i modelli presi in esame, incrementare progressivamente il numero degli intagli diagrammando rispettivamente:
  - nel caso in cui il raggio all'apice dell'intaglio è diverso da zero, plottare la tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria del modello in funzione dello spessore fino a che l'andamento della tensione arrivi a convergenza;
  - nel caso di spigolo vivo, cioè raggio all'apice dell'intaglio pari a zero, calcolare e confrontare il fattore di intensificazione delle tensioni nelle due diverse direzioni:
    1. lungo lo spessore della piastra, a delle opportune distanze dall'apice dell'intaglio pari a 0.001, 0.01, 0.1, 0.2mm;
    2. lungo la direzione di propagazione dell'intaglio in determinati nodi lungo lo spessore.



## 2. MODELLO 1: $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$

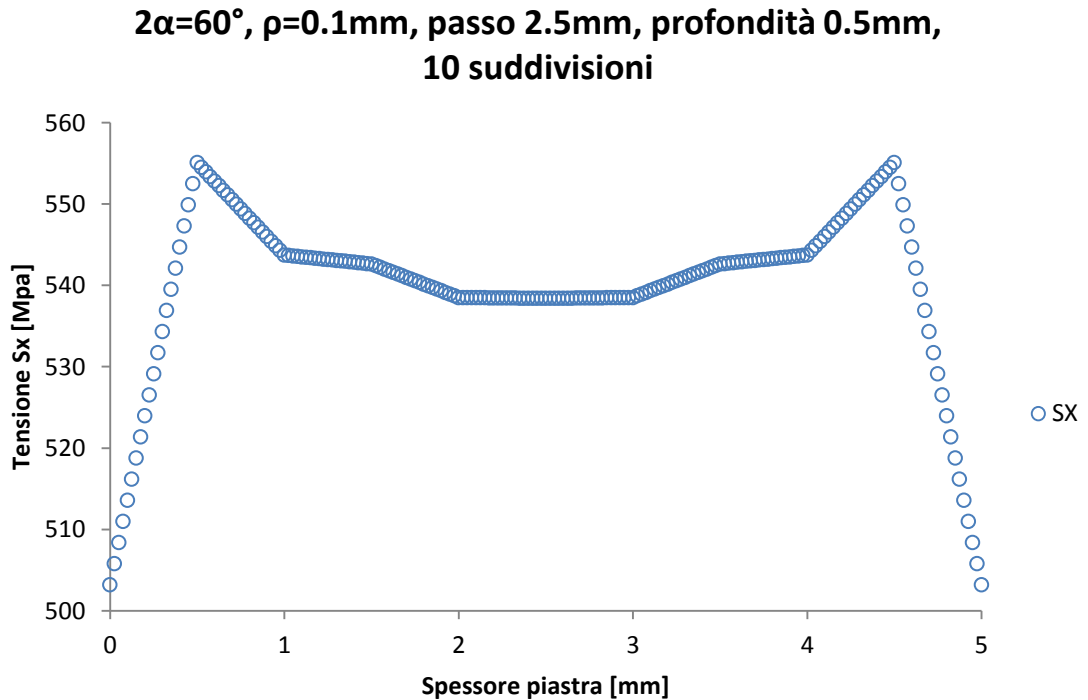
### 2.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm

Nella geometria analizzata, si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm. Il grafico sottostante rappresenta il diverso andamento che assume la tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$ , quest'ultima plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria, avendo impostato al momento dell'estrusione un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 50 e 80. Si può osservare come la tensione  $S_x$  assuma un andamento simmetrico lungo lo spessore, presentando 2 picchi di tensione massima nelle vicinanze dei bordi della piastra. L'andamento di tensione più regolare si ottiene impostando, al momento dell'estrusione, 80 suddivisioni lungo lo spessore.



## 2.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm

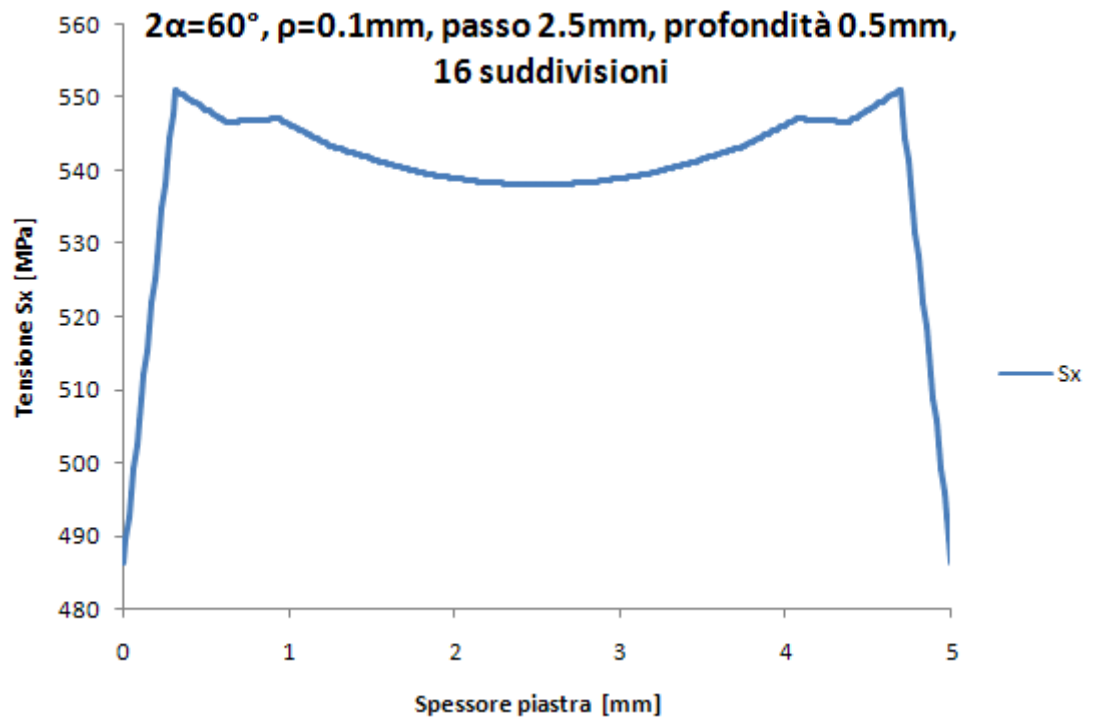
Nella seguente geometria, i parametri geometrici principali sono rimasti gli stessi, cioè: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$ . Lo spessore della piastra viene diminuito passando da 10 a 5mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 10. La tensione  $S_x$  assume un andamento simmetrico lungo lo spessore con 2 picchi di tensione massima nelle vicinanze dei bordi della piastra.



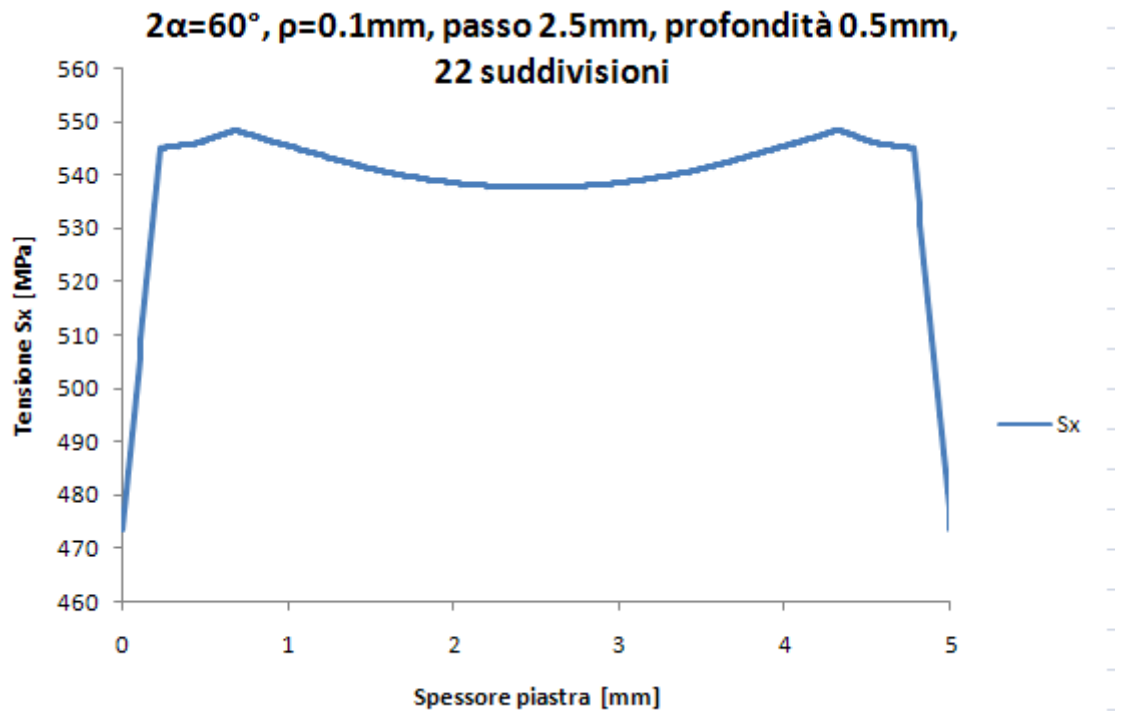
Dal grafico sovrastante, si può osservare come la tensione  $S_x$  in funzione dello spessore della piastra  $S$  non presenti un andamento regolare, in quanto si è impostato un numero di suddivisioni lungo lo spessore troppo basso: nelle simulazioni successive si cercherà di aumentare il numero di suddivisioni lungo l'asse  $z$  al momento dell'estrusione, cioè lo spessore, in modo tale da ottenere un grafico *tensione-spessore* il cui andamento sia il più possibile regolare.

Si sono imposte le seguenti suddivisioni al momento dell'estrusione: 16-22-26-30-40-50.

Per ciascuna di esse si è proceduto analogamente definendo un path lungo lo spessore all'apice dell'intaglio in corrispondenza dell'asse di simmetria, ottenendo rispettivamente i seguenti grafici di tensione massima  $S_x$  all'apice in funzione del numero di suddivisioni impostate lungo lo spessore.

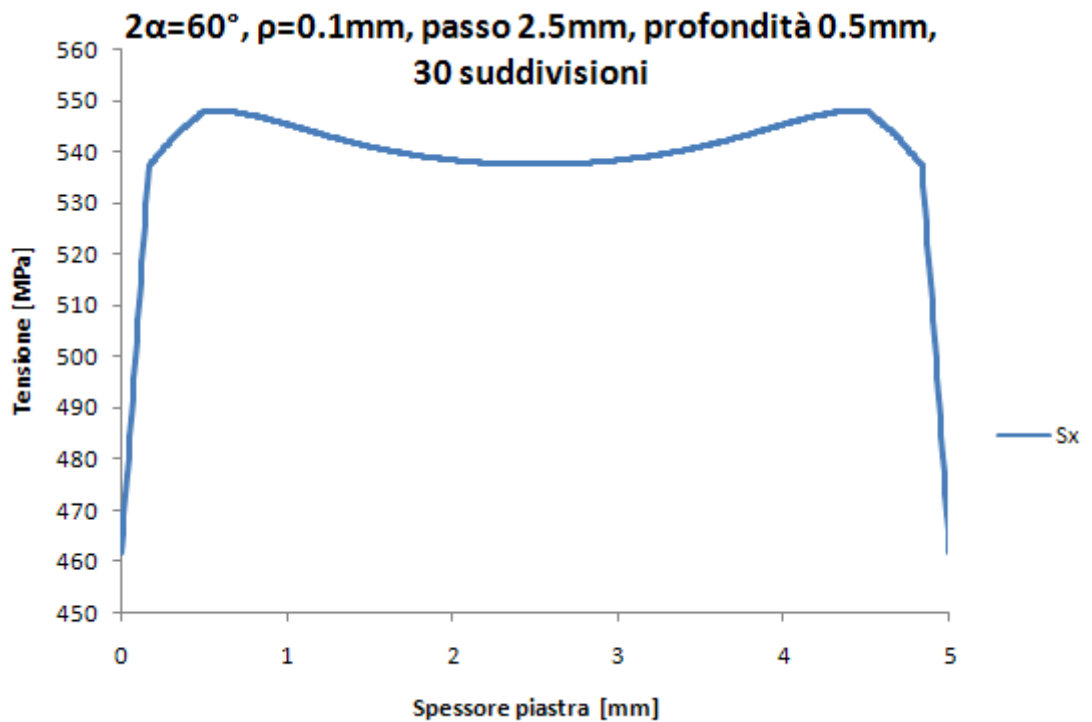
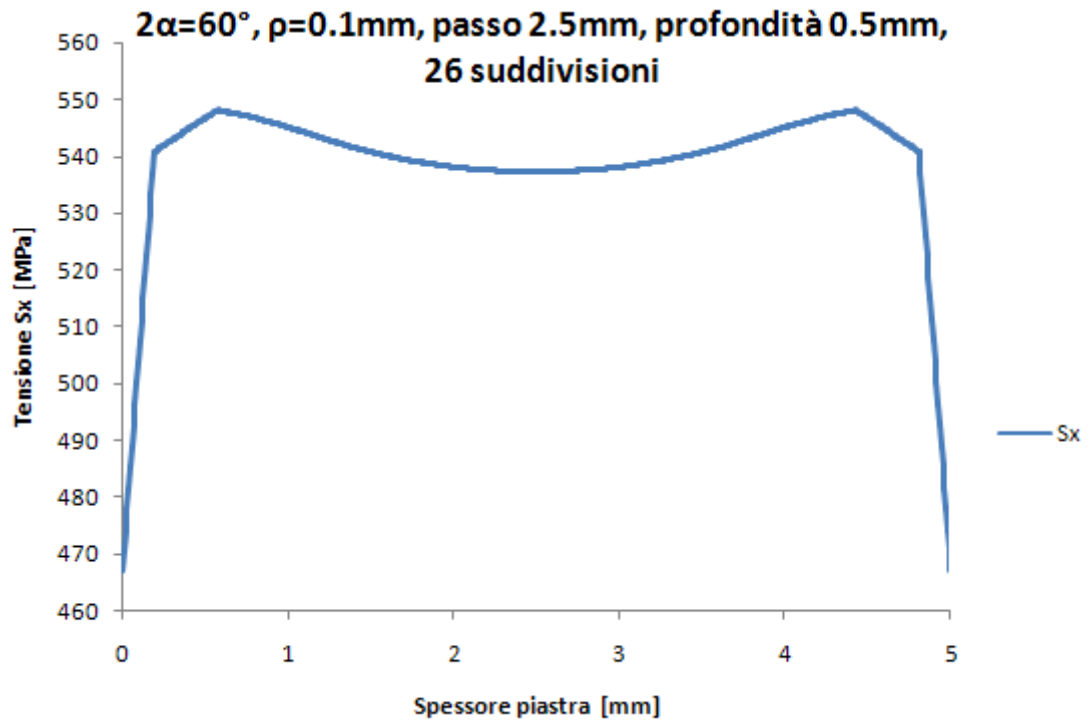


L'andamento del grafico sovrastante non è ancora regolare per cui, nella simulazione successiva, si aumenterà il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione ponendolo pari a 22.

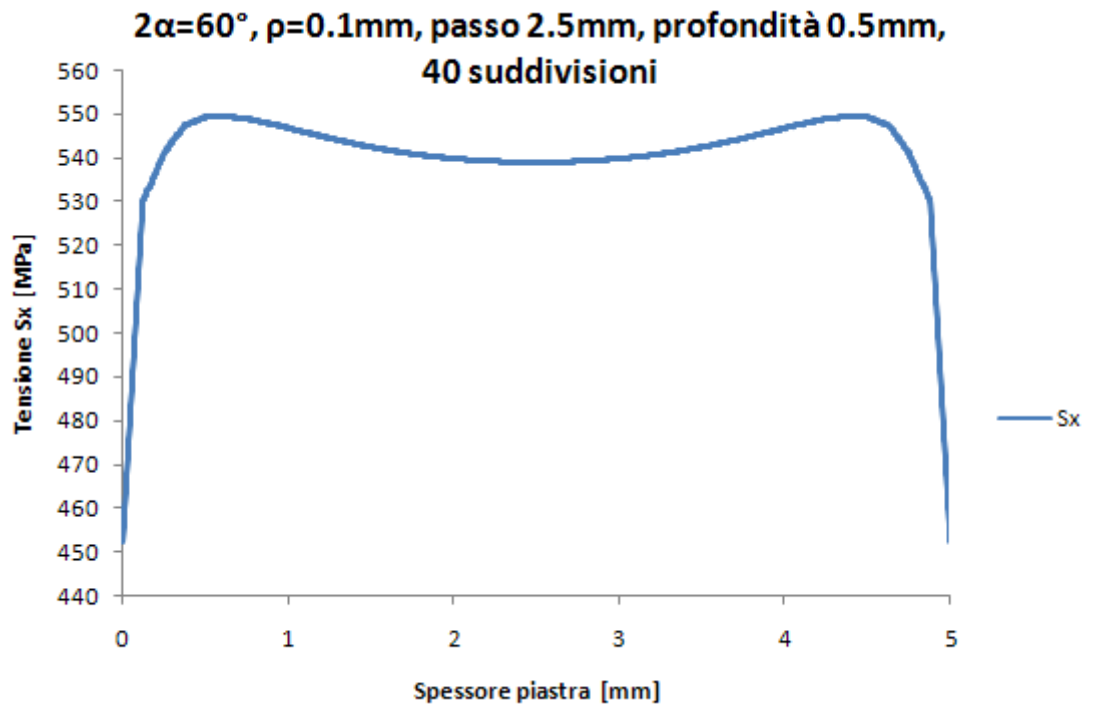


Si può notare come, aumentando progressivamente il numero di suddivisioni lungo lo spessore, il valore di tensione massima rimanga pressoché costante e circa pari a 550MPa, mentre l'andamento della tensione si regolarizza sempre più. Si aumenta ulteriormente il numero di suddivisioni passando da 20 a 26. Si può osservare dal grafico sottostante come l'andamento sia sempre più regolare in funzione dello spessore della piastra.

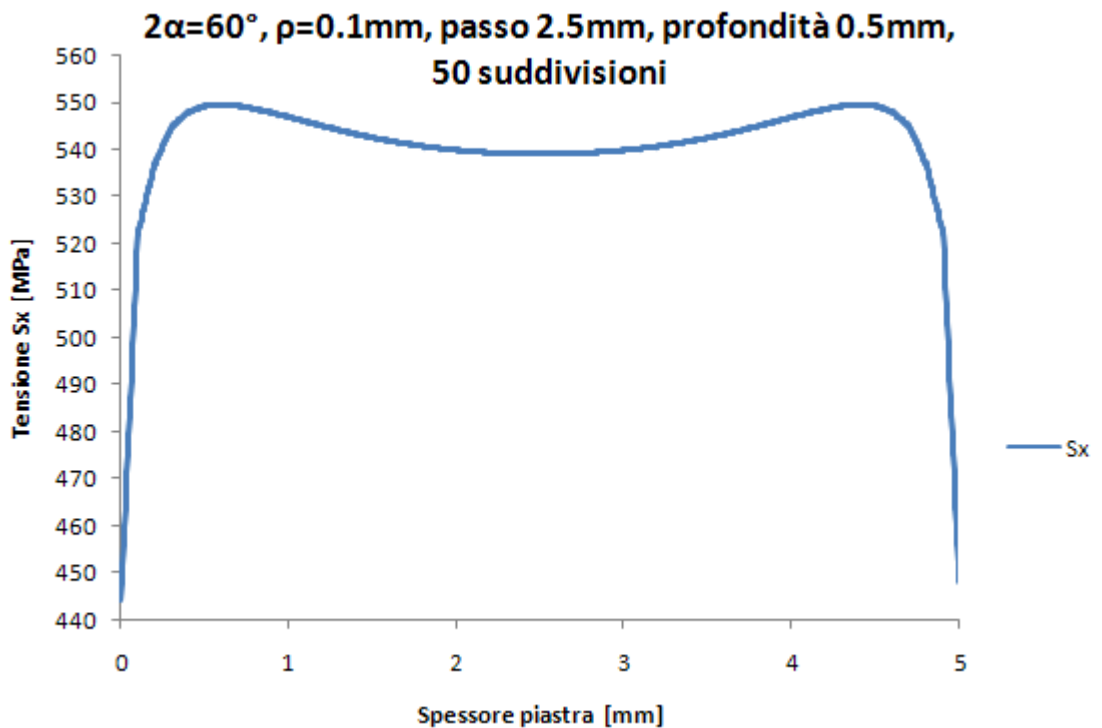




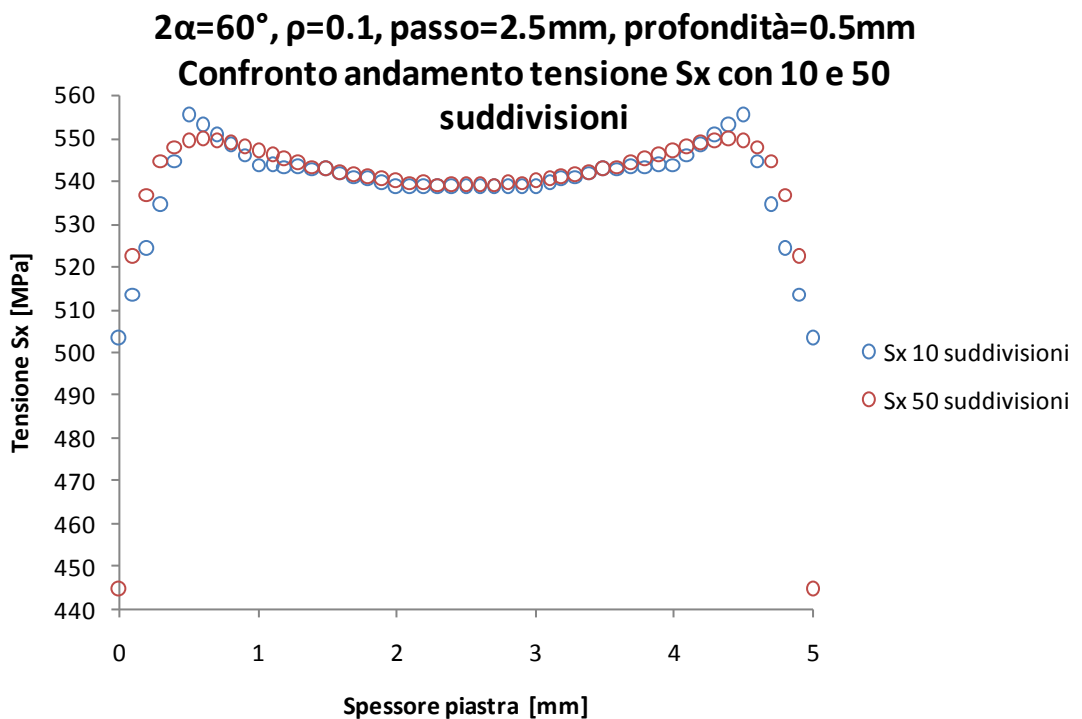
Nel grafico seguente si sono impostate 40 suddivisioni lungo lo spessore e l'andamento di tensione che si ottiene è quasi del tutto regolare.



Dal grafico sovrastante si è quasi giunti a convergenza infatti, impostato a 50 il numero di divisioni lungo lo spessore, il grafico che si ottiene presenta un andamento perfettamente regolare, visibile nella figura sottostante.

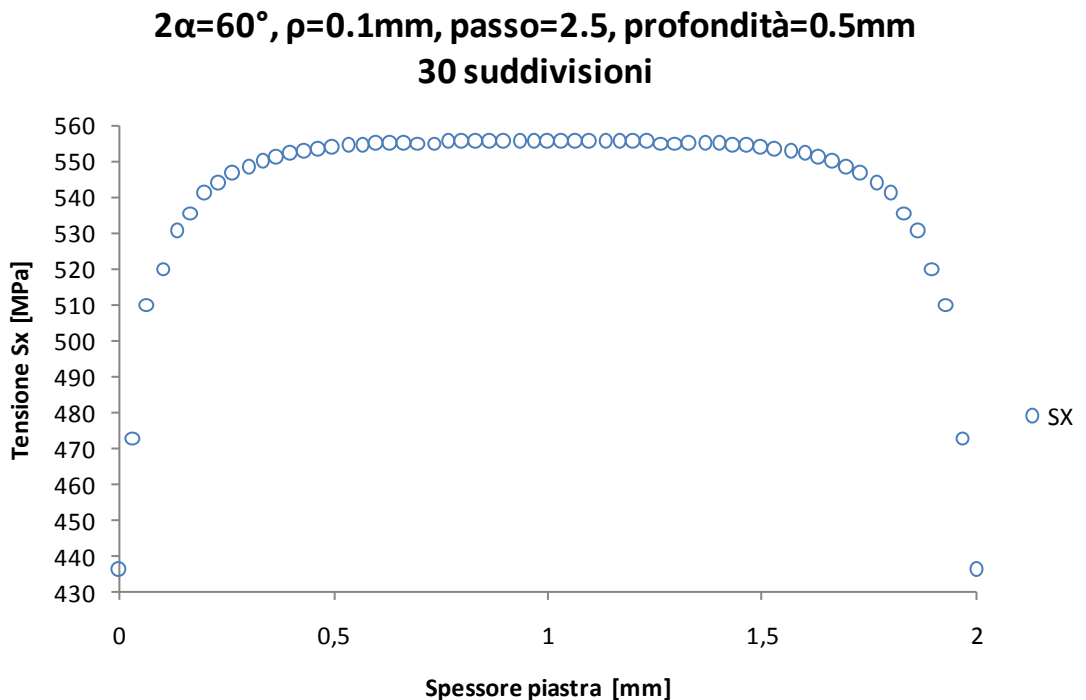


Queste simulazioni sono state fatte mantenendo invariati i principali parametri geometrici, cambiando solamente il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione lungo lo spessore, mantenuto anche quest'ultimo costante. Per riassumere graficamente quello che è stato fatto, il grafico sottostante mette a confronto l'andamento della tensione  $S_x$  avendo impostato al momento dell'estrusione 10 e 50 suddivisioni lungo lo spessore di 5mm. Si osserva come la tensione  $S_x$  assuma un andamento del tutto regolare impostando a 50 il numero di suddivisioni lungo lo spessore.



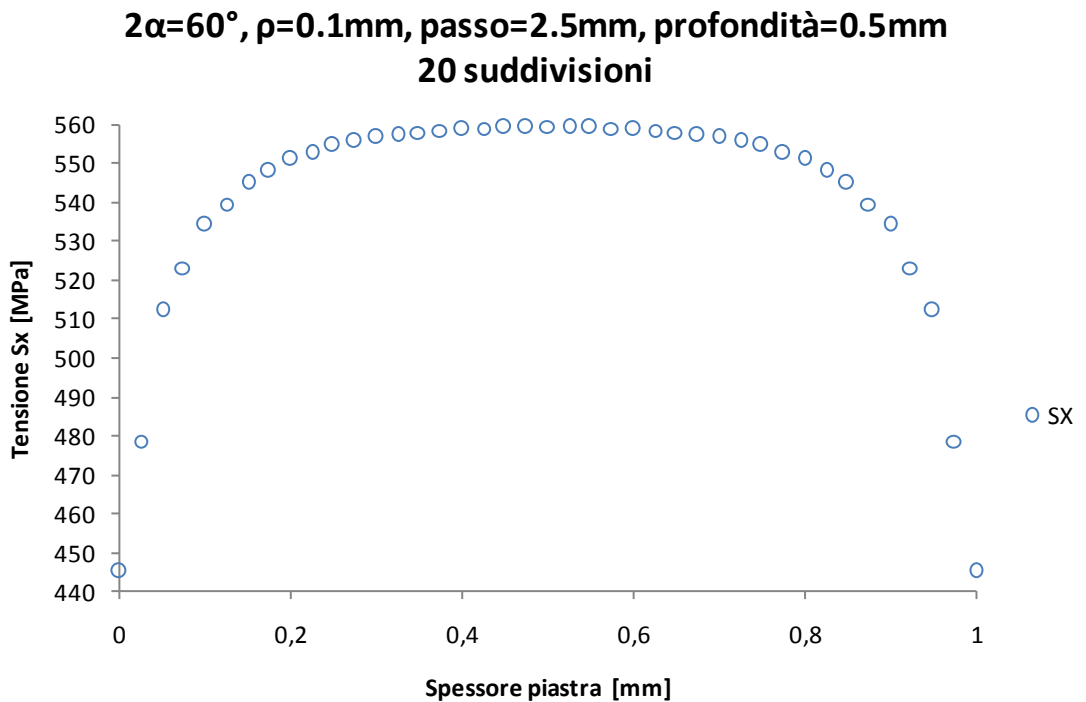
### 2.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm

Nella geometria analizzata si mantengono costanti tutte le dimensioni geometriche principali, cioè angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$ , il raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , il passo  $p=2.5\text{mm}$ , la profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ , variando lo spessore della piastra passando da 5mm a 2mm. Analogamente al caso precedente, si plotta l'andamento della tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, procedendo lungo lo spessore della piastra. Il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione è posto pari a 30. Come si può osservare, rispetto ai casi con spessore di piastra pari a 10mm e 5mm, la tensione  $S_x$  assume un diverso andamento: simmetrico in funzione dello spessore, solo che non vi sono i 2 picchi di tensione massima in prossimità dei bordi bensì, in mezzeria, si ha per un tratto un andamento quasi costante della tensione per poi diminuire simmetricamente all'avvicinarsi dei bordi della piastra. Lo spessore della piastra quindi, influenza l'andamento della tensione  $S_x$ .



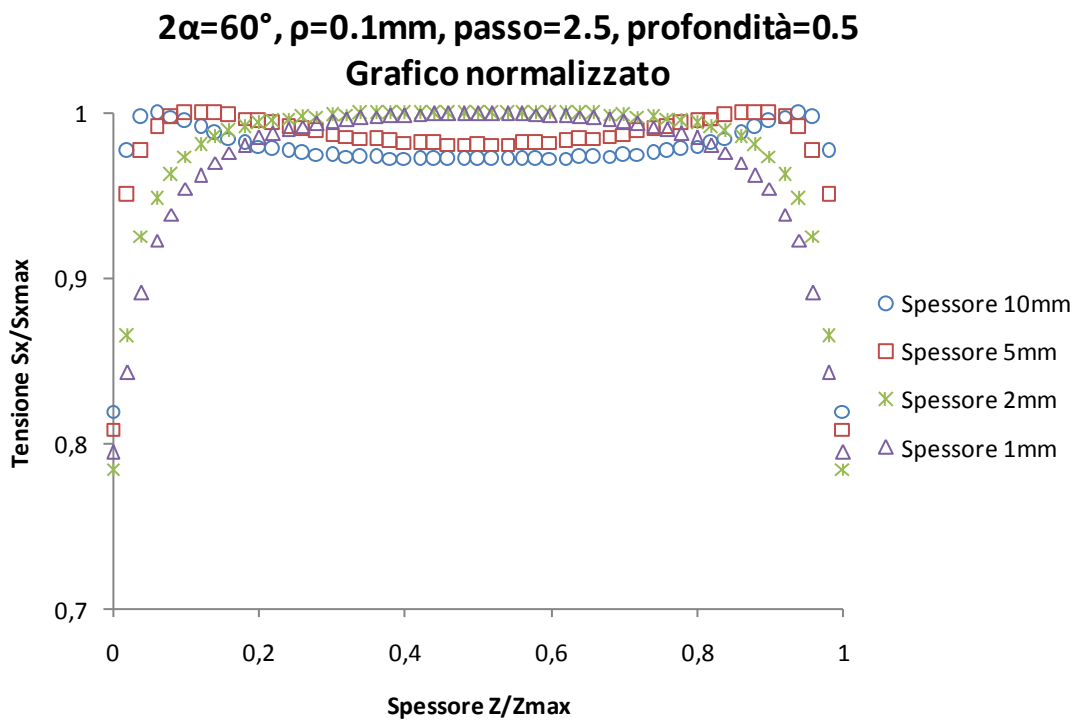
## 2.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm

Nella geometria analizzata si mantengono costanti tutte le dimensioni geometriche principali, cioè angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$ , il raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , il passo  $p=2.5\text{mm}$ , la profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$  e si varia lo spessore della piastra passando da 2mm a 1mm. Si procede analogamente andando a plottare l'andamento delle tensioni sempre all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore. Il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione è posto pari a 20. Anche in questo caso la tensione presenta un andamento simmetrico lungo lo spessore, ma il tratto piano di tensione massima è più corto rispetto ad avere uno spessore di piastra di 2mm. Si può ribadire e confermare come lo spessore della piastra influenzi l'andamento della tensione  $S_x$ .



## 2.5 Grafico riassuntivo normalizzato

Per riassumere brevemente quello che è stato fatto nei punti precedenti, si confrontano i diversi andamenti che la tensione assume in funzione degli spessori analizzati mediante un unico grafico normalizzato il quale, sull'asse delle ascisse presenta il rapporto tra spessore e spessore massimo, mentre sull'asse delle ordinate, il rapporto tra tensione e tensione massima. Si possono osservare, dal grafico sottostante, i diversi andamenti della tensione  $S_x$  al variare dello spessore: nel caso di spessore pari a 10mm e 5mm, si hanno due punti simmetrici lungo lo spessore in prossimità dei bordi della piastra nei quali si ha la tensione massima, la quale poi presenta un calo nella parte centrale. Diminuendo lo spessore invece, la tensione massima si concentra in mezzeria dello spessore della piastra.

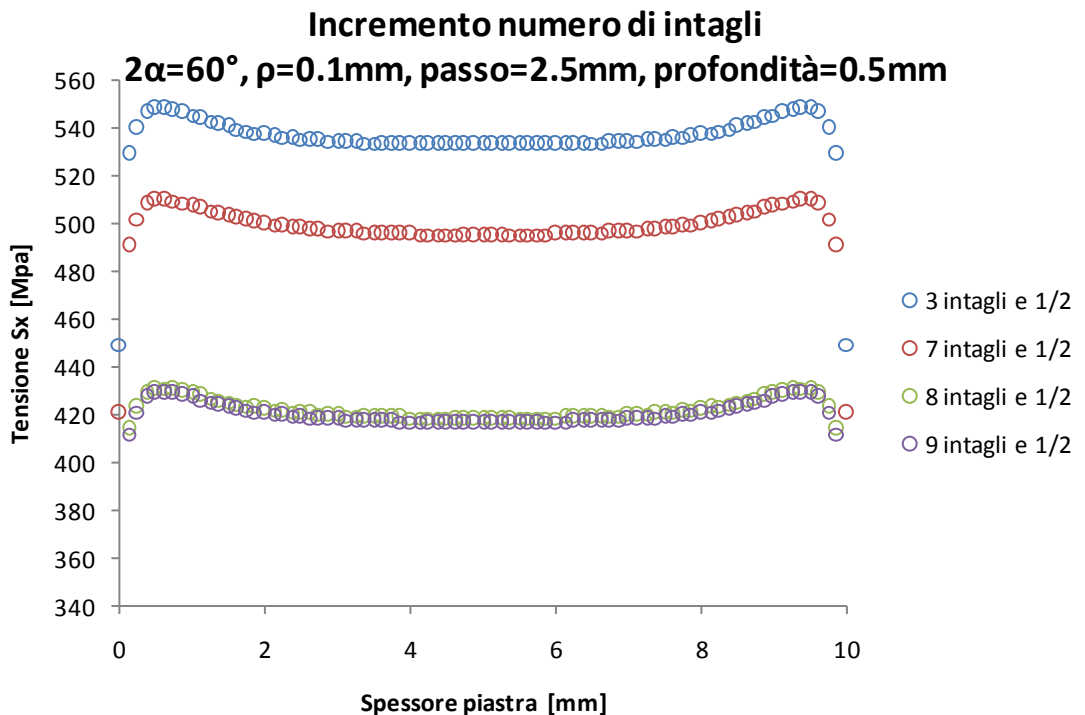


## 2.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE

Nel modello di piastra iniziale erano presenti tre intagli e mezzo: si vuole analizzare come varia la medesima tensione  $S_x$  andando a plottare l'andamento della tensione all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore, incrementando progressivamente il numero degli intagli per tutti gli spessori precedentemente presi in esame. Anche in questo caso, si procede analogamente modellando solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra, sfruttando il concetto di simmetria.

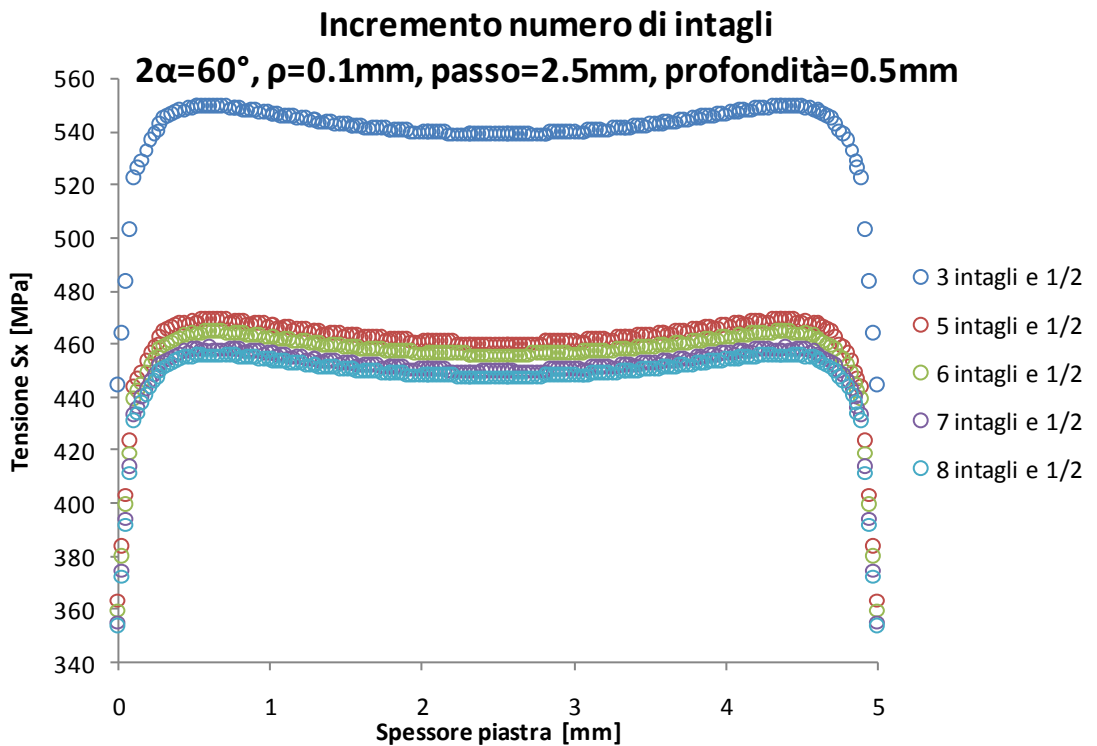
### 2.6.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che assume la tensione  $S_x$  aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, fino ad arrivare a convergenza con un valore compreso tra 420-430MPa, quando sulla piastra sono presenti 9 intagli e mezzo.



### 2.6.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm

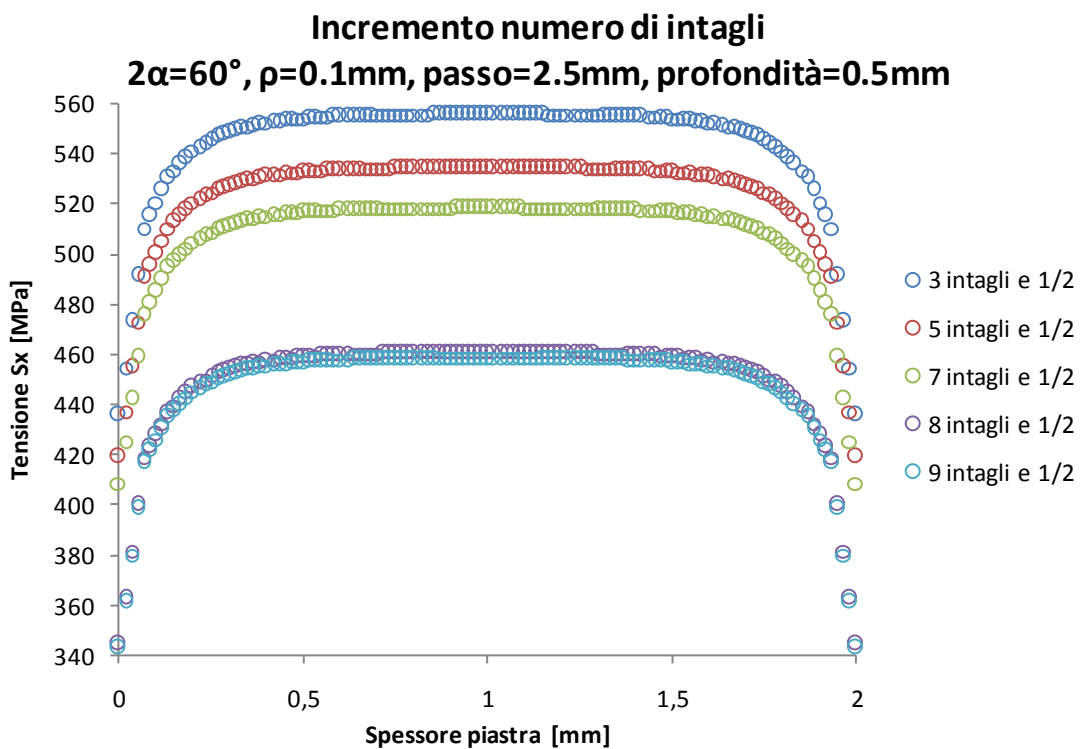
Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, fino ad arrivare a convergenza con un valore compreso tra 450-460MPa, quando sulla piastra sono presenti 8 intagli e mezzo.





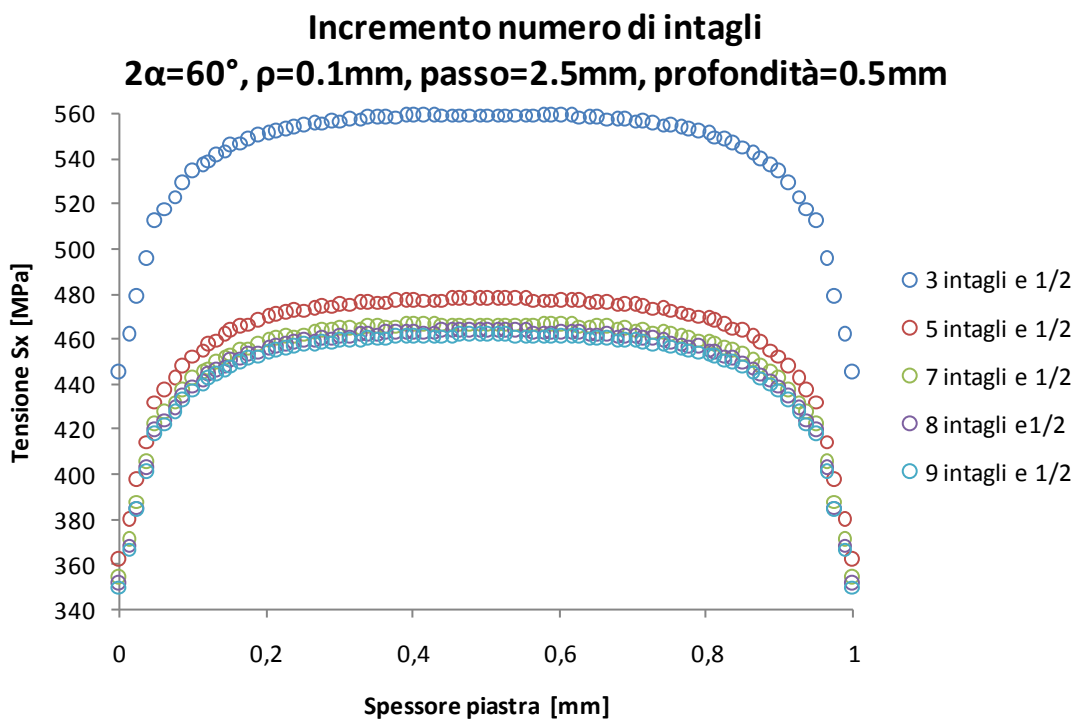
### 2.6.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, fino ad arrivare a convergenza con un valore compreso tra 450-460 MPa, quando sulla piastra sono presenti 9 intagli e mezzo.



### 2.6.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 1mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, fino ad arrivare a convergenza con un valore compreso tra 450-460MPa, quando sulla piastra sono presenti 9 intagli e mezzo.



### 3. MODELLO 2: $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$

Si è costruito un nuovo modello cambiando il raggio all'apice dell'intaglio, ponendolo pari ad 1mm. Cambiando il raggio all'apice dell'intaglio, per mantenere gli stessi rapporti geometrici  $\rho/t$  e  $t/p$ , necessariamente si è costretti a cambiare anche il passo e la profondità dell'intaglio.

Si ottengono così i seguenti valori per il passo e la profondità dell'intaglio:

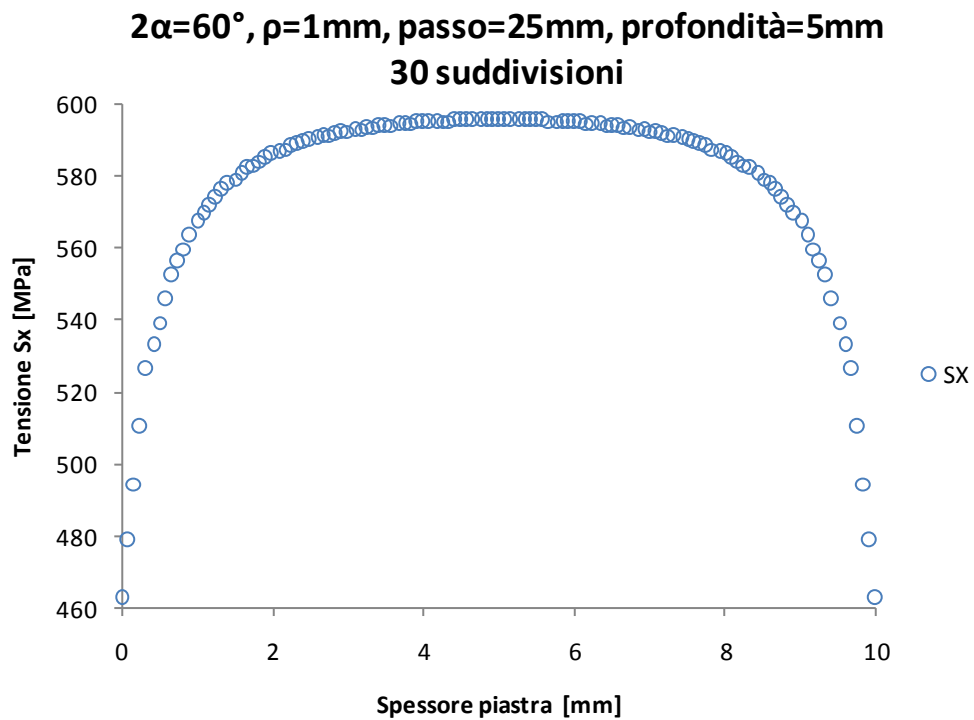
$$\frac{\rho}{t} = 0,2 \rightarrow t = 5\text{mm}$$

$$\frac{t}{p} = 0,2 \rightarrow p = 25\text{mm}$$

Nelle simulazioni svolte, l'obiettivo è quello di plottare l'andamento della tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, in funzione dei diversi spessori di piastra presi in esame, rispettivamente quest'ultimi pari a 10mm, 5mm, 2mm, 1mm. Successivamente, per gli spessori considerati, si aumentano progressivamente sulle piastre il numero degli intagli fino a quando la tensione massima  $S_x$  non assuma un valore pressochè costante.

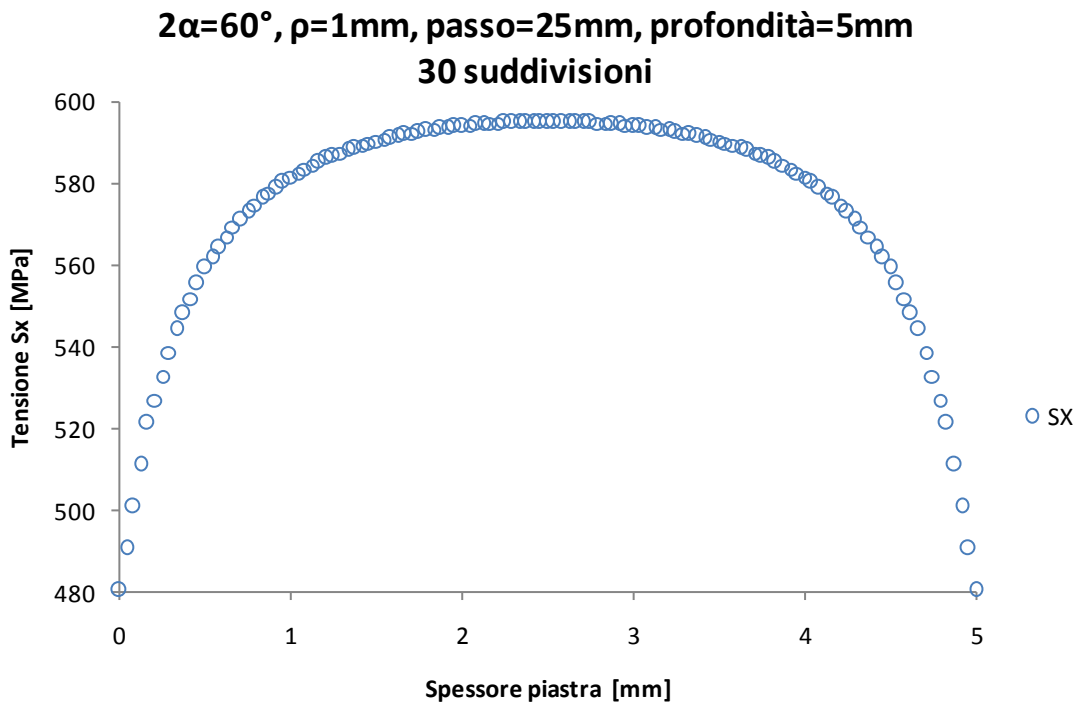
### 3.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm

Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento simmetrico della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  della piastra. La tensione  $S_x$  è plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore, con il valore massimo di tensione in mezzeria della piastra pari a circa 590MPa.



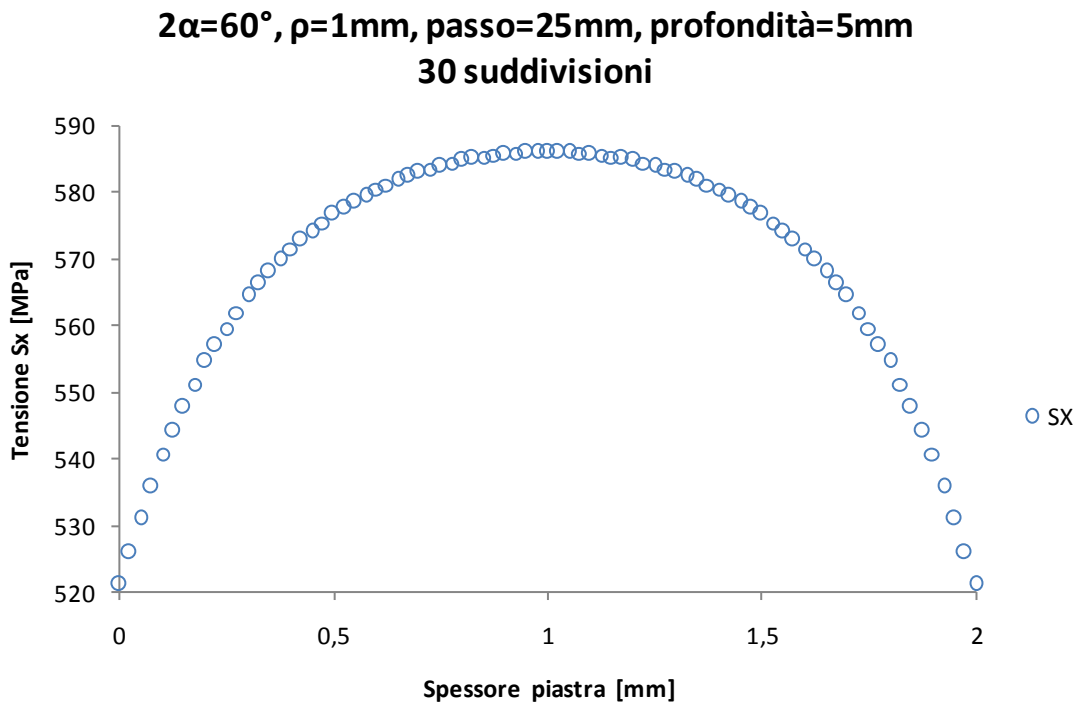
### 3.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm

Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento simmetrico della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  della piastra. La tensione  $S_x$  è plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Anche in questo caso si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezzeria della piastra pari a circa 590MPa.



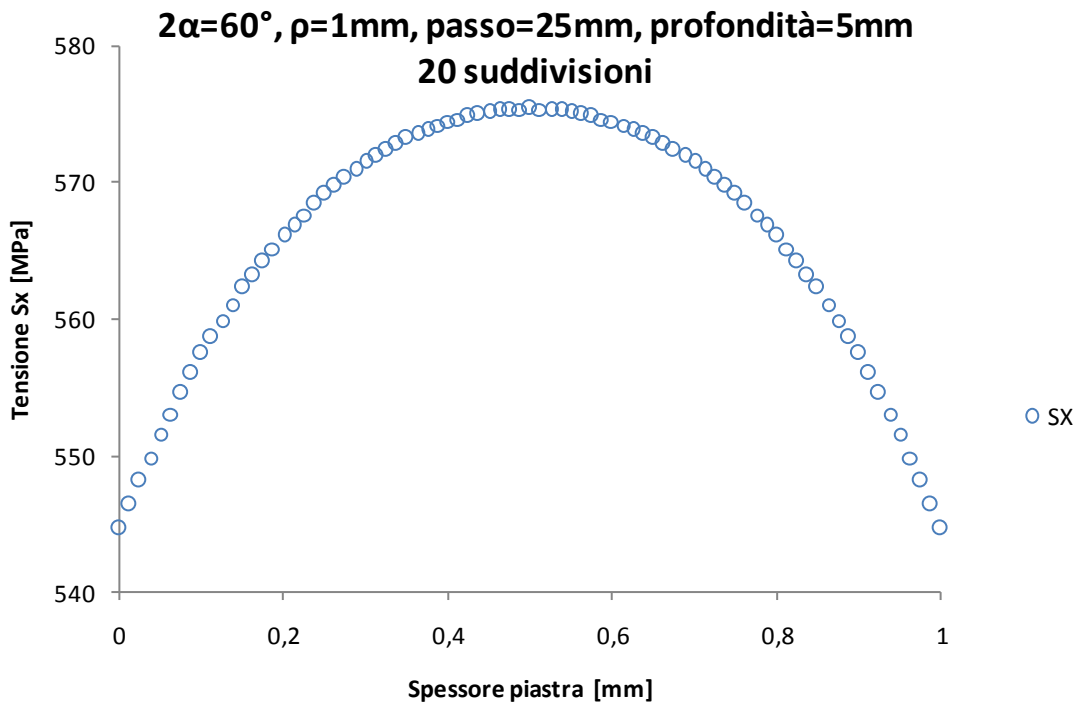
### 3.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm

Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento simmetrico della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  della piastra. La tensione  $S_x$  è plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Anche in questo caso si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezzeria della piastra pari a circa 590MPa.



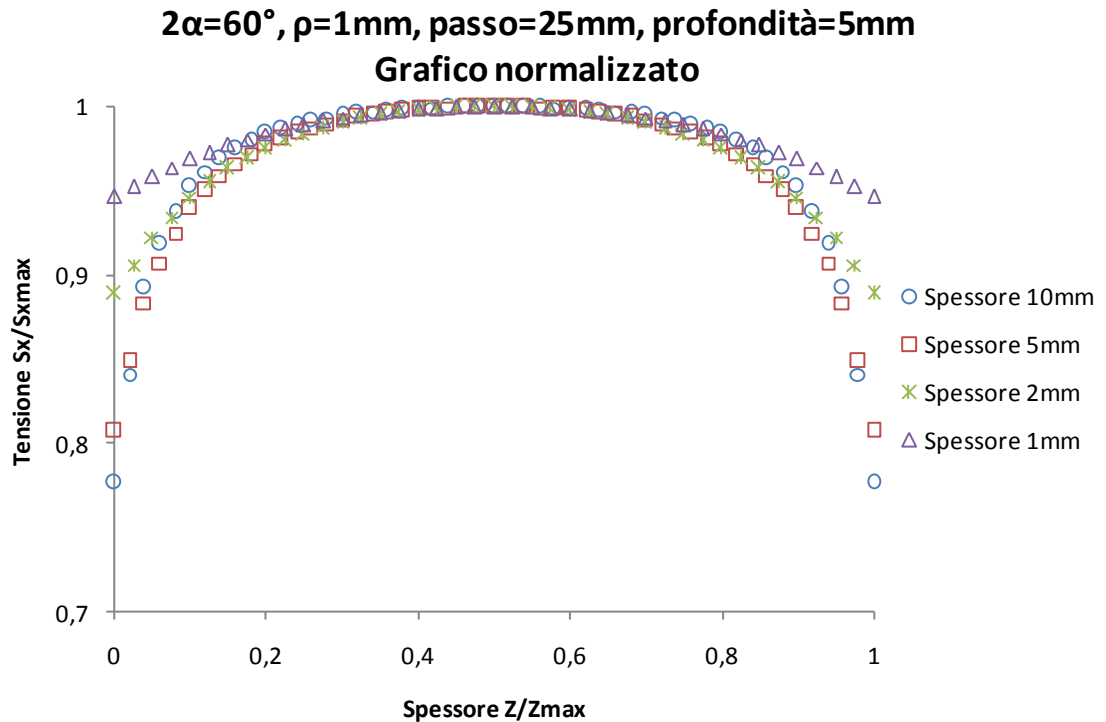
### 3.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm

Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento simmetrico della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  della piastra. La tensione  $S_x$  è plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 20. Si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezzera della piastra pari a circa 575MPa.



### 3.5 Grafico riassuntivo normalizzato

Successivamente, si confrontano i diversi andamenti della tensione  $S_x$  in funzione degli spessore analizzati mediante un unico grafico normalizzato il quale presenta, sull'asse delle ascisse il rapporto tra spessore e spessore massimo, mentre sull'asse delle ordinate, il rapporto tra tensione e tensione massima. Si può osservare dal grafico sottostante che per tutti i modelli aventi raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$  e angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$ , la tensione  $S_x$  massima si concentra in mezzeria delle piastre e, il suo andamento, è molto simile per tutti i modelli analizzati, nonostante si diminuisca lo spessore.



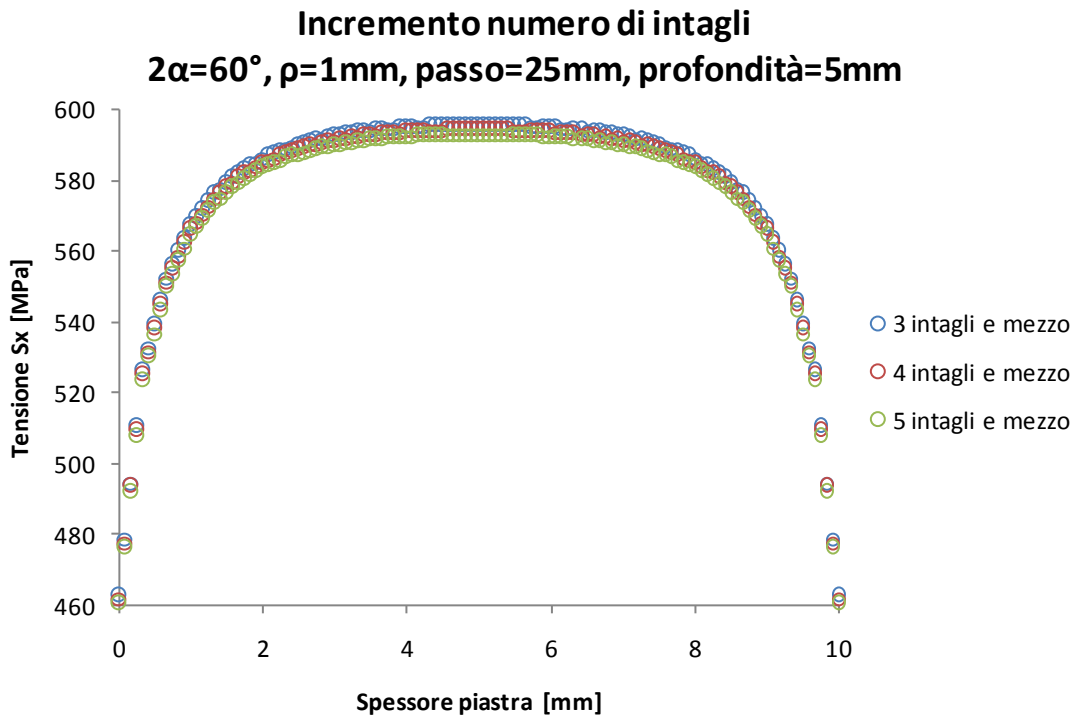


### **3.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE**

Nel modello di piastra iniziale erano presenti tre intagli e mezzo: si vuole analizzare come varia la medesima tensione  $S_x$  andando a plottare l'andamento della tensione all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore, incrementando progressivamente il numero degli intagli per tutti gli spessori precedentemente presi in esame. Anche in questo caso, si procede analogamente modellando solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra, sfruttando il concetto di simmetria.

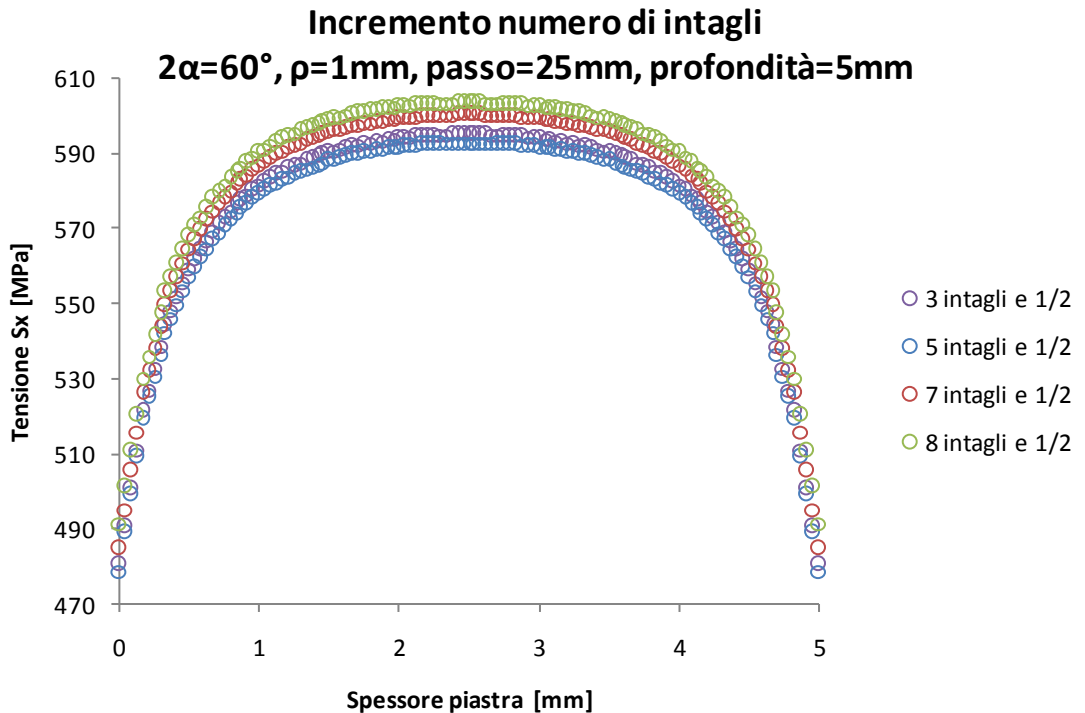
### 3.6.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisce passando da 3 a 4 a 5 intagli, anche se mantiene un valore pressoché costante, compreso tra 590-600MPa.



### 3.6.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione rimanga pressochè costante fino a 5 intagli con un valore massimo compreso tra 590-600 MPa poi, continuando ad aumentare il numero di intagli sino ad arrivare a 8, anziché diminuire come ci si aspetterebbe, aumenta, ma questo si presuma sia dovuto ad un problema di soluzione sul codice ANSYS.

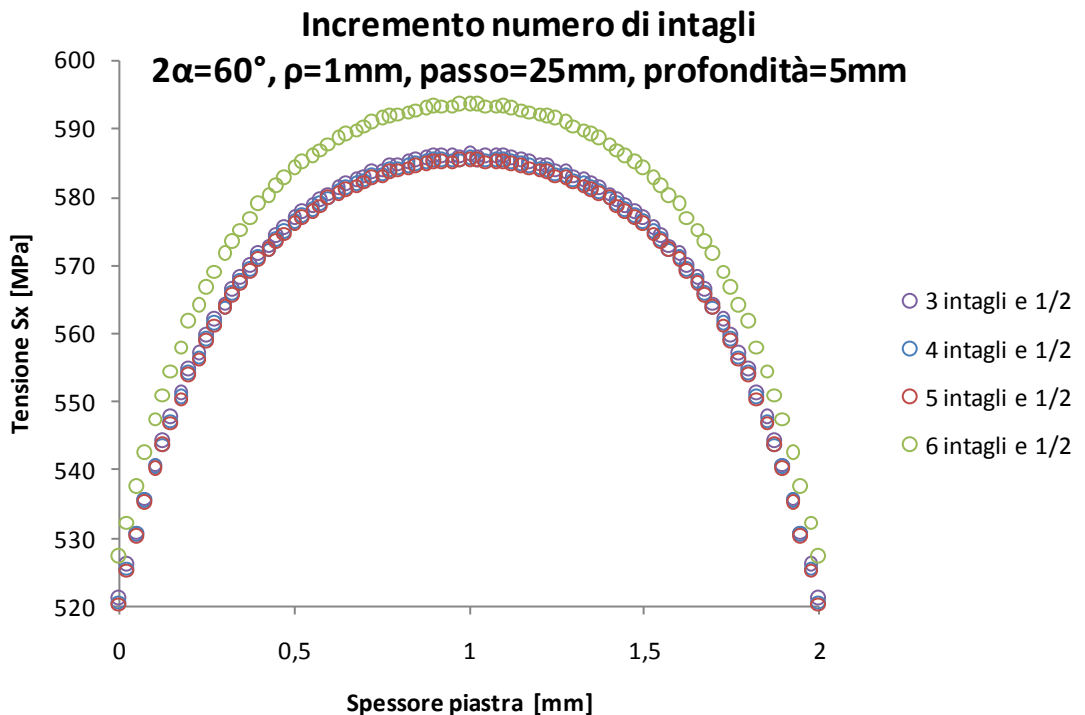


Per verificare che il modello sia corretto, si è fatta una prova di convergenza della tensione cioè, nel modello 3D si è incrementato il numero di elementi in prossimità dell'apice dell'intaglio fino a che la tensione  $S_x$  arriva ad un valore massimo costante, cioè si è nella zona di plateau. Nel modello iniziale, il numero di elementi è pari a 39750 ed il valore di tensione massima  $S_x$  plottata all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria è pari a 595MPa. Nella simulazione successiva il numero di elementi è stato incrementato a 40950 e la tensione

massima è pari a 600MPa: questo sta a confermare che il modello è corretto perché le tensioni sono quasi uguali, cioè si ha la convergenza della tensione in funzione del numero di elementi. Il problema deriva dal software ANSYS: per far sì che i risultati siano corretti, cioè che la tensione diminuisca incrementando il numero di intagli, bisognerebbe triplicare il numero di elementi nel modello, però quest'ultimo risulterebbe poi pesantissimo e impiegherebbe molto tempo a fornire la soluzione.

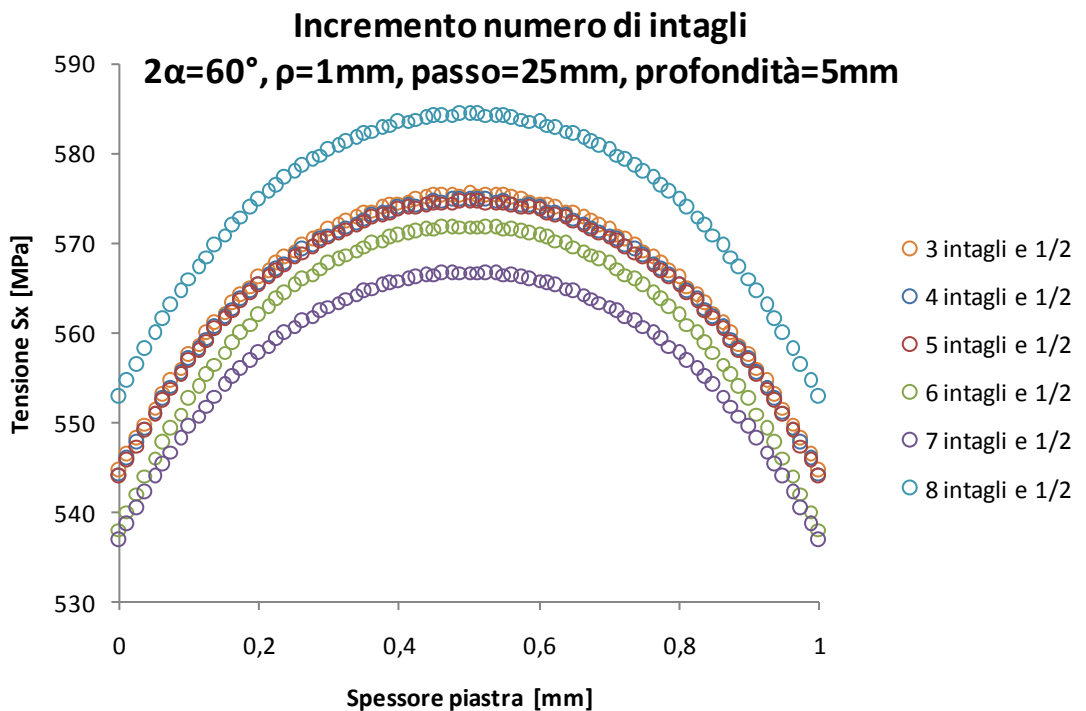
### 3.6.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione rimanga pressochè costante fino a 5 intagli con un valore massimo compreso tra 590-600 MPa poi, continuando ad aumentare il numero di intagli, anziché diminuire come ci si aspetterebbe, aumenta. Anche in questo caso si presuma sia dovuto ad un problema di soluzione sul codice ANSYS, come nel caso precedente.



### 3.6.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione rimanga pressoché costante fino a 5 intagli con un valore massimo di 575MPa poi, continuando ad aumentare il numero di intagli, anziché diminuire come ci si aspetterebbe, aumenta. Anche in questo caso si presuma sia dovuto ad un problema di soluzione sul codice ANSYS.





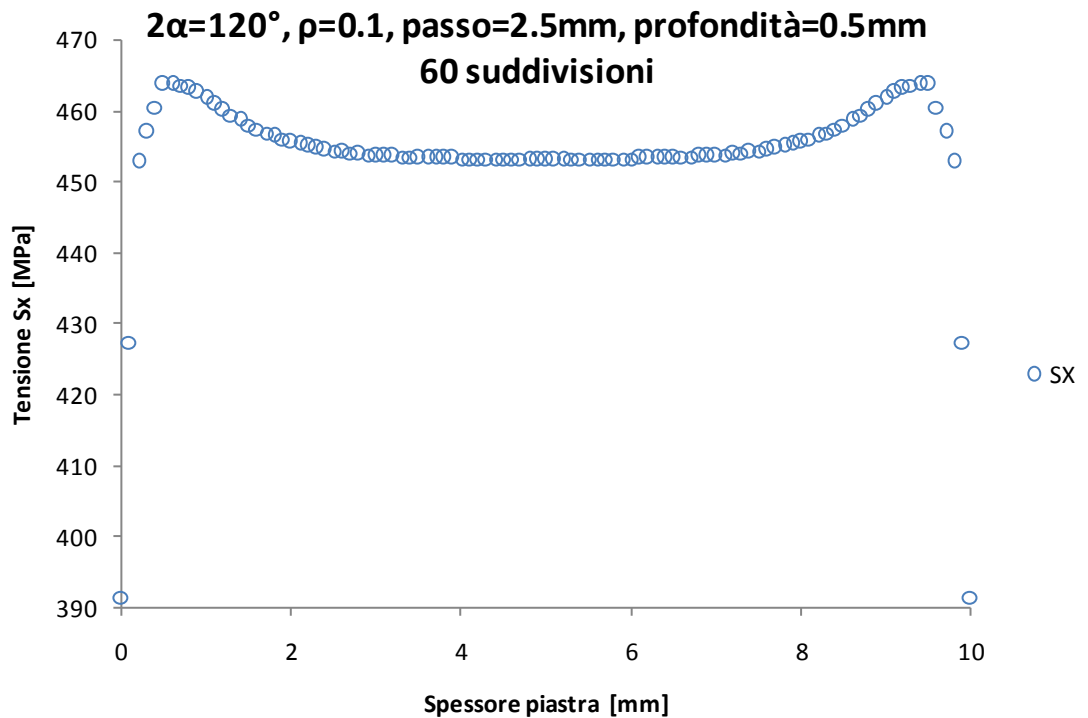
#### **4. MODELLO 3: $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$**

Si è costruito un nuovo modello con i seguenti parametri geometrici principali: angolo di apertura dell'intaglio pari a  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio pari a  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo  $p=2.5\text{mm}$ , profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ . L'obiettivo, anche in questo caso, è quello di plottare la tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria per i seguenti spessori della piastra: 10, 5, 2 e 1mm, costruendo poi un grafico normalizzato avente sull'asse delle ascisse il rapporto tra spessore e spessore massimo, mentre sull'asse delle ordinate, il rapporto tra tensione plottata all'apice e tensione massima..

Successivamente si aumenta progressivamente il numero di intagli fino a che la tensione massima assume un valore pressoché costante.

#### 4.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm

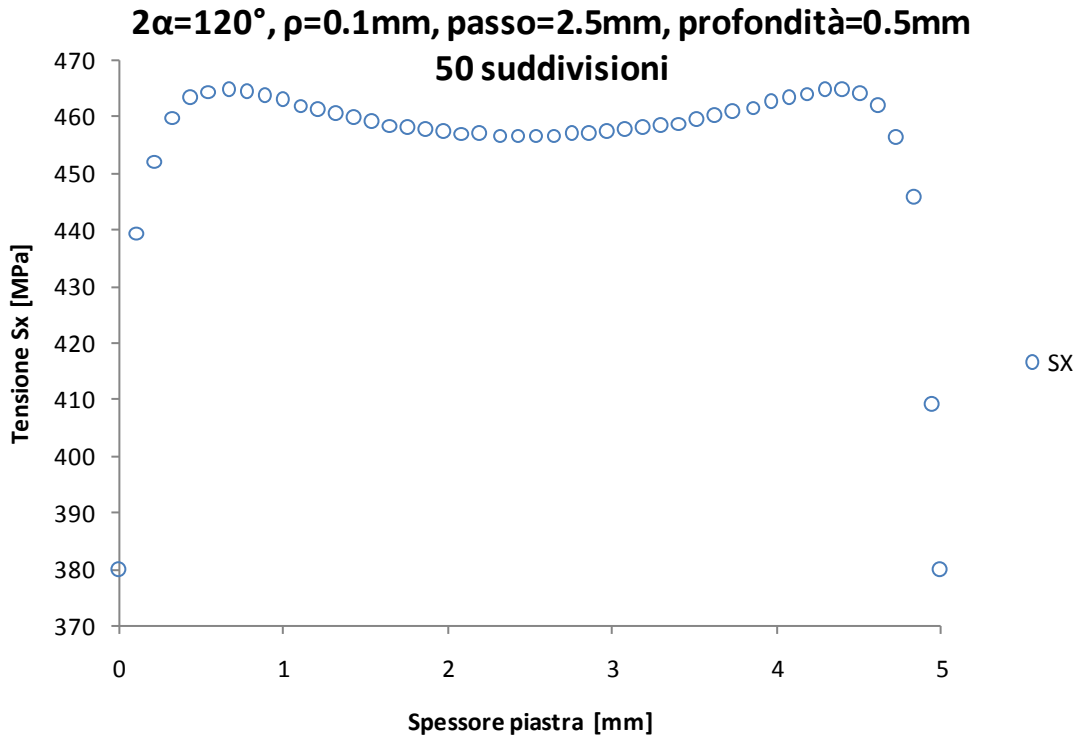
Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm. Il grafico sottostante rappresenta il diverso andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 60. Si può osservare come la tensione  $S_x$  assuma un andamento simmetrico lungo lo spessore, presentando 2 picchi di tensione massima in prossimità dei bordi della piastra.





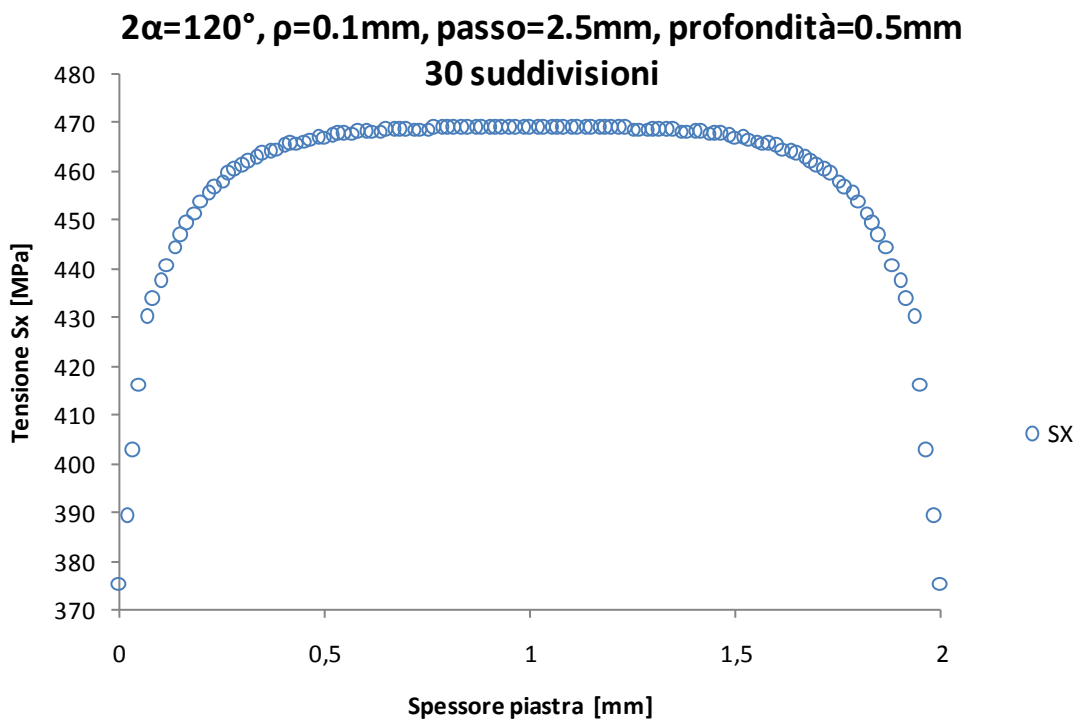
#### 4.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm

Nella geometria analizzata si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm. Il grafico sottostante rappresenta l'andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 50. Si può osservare come la tensione  $S_x$  assuma un andamento simmetrico lungo lo spessore, presentando due picchi di tensione massima in prossimità dei bordi della piastra.



### 4.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm

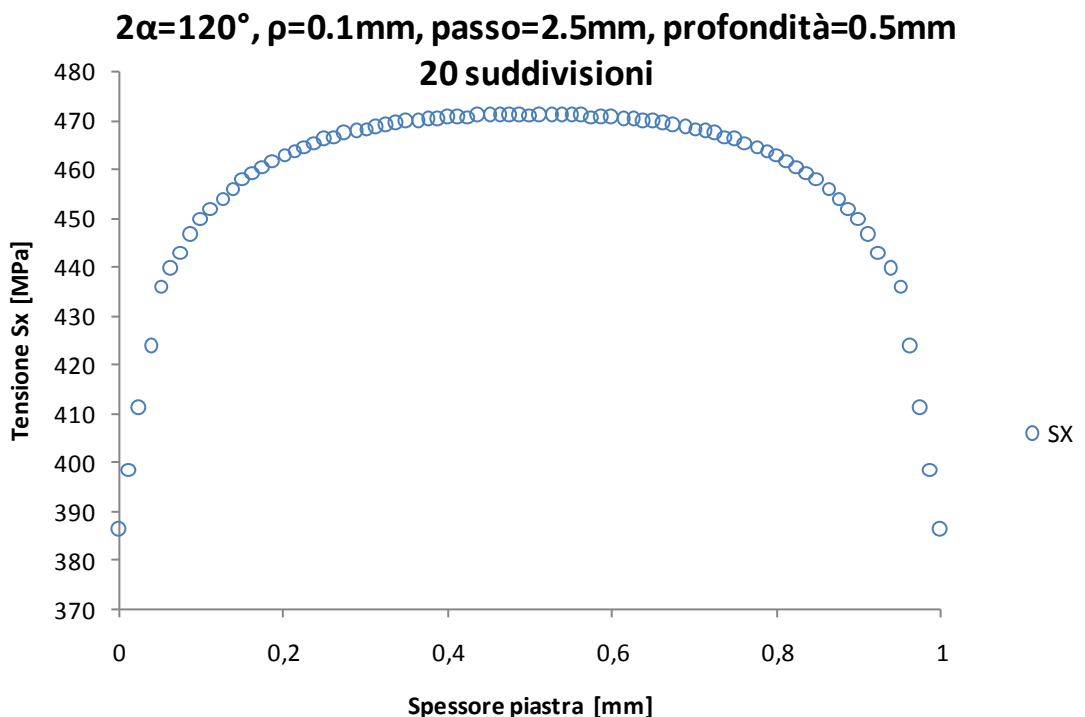
Nella geometria analizzata si mantengono costanti tutte le dimensioni geometriche principali, cioè angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=120^\circ$ , il raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , il passo  $p=2.5\text{mm}$ , la profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ , variando lo spessore della piastra passando da 5mm a 2mm. Analogamente al caso precedente, si va a plottare l'andamento della tensione  $S_x$  sempre all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore e si vuole capire come quest'ultima varia in funzione dello spessore. Il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione lo si è posto pari a 30.



Questa volta, rispetto ai casi con spessore di 10mm e 5mm, la tensione  $S_x$  assume un diverso andamento: l'andamento è simmetrico in funzione dello spessore, solo che non vi sono i 2 picchi di tensione massima in prossimità dei bordi bensì, in mezzzeria, si ha per un tratto un andamento quasi costante della tensione per poi diminuire simmetricamente all'avvicinarsi dei bordi della piastra. Lo spessore della piastra quindi, influenza l'andamento della tensione  $S_x$ .

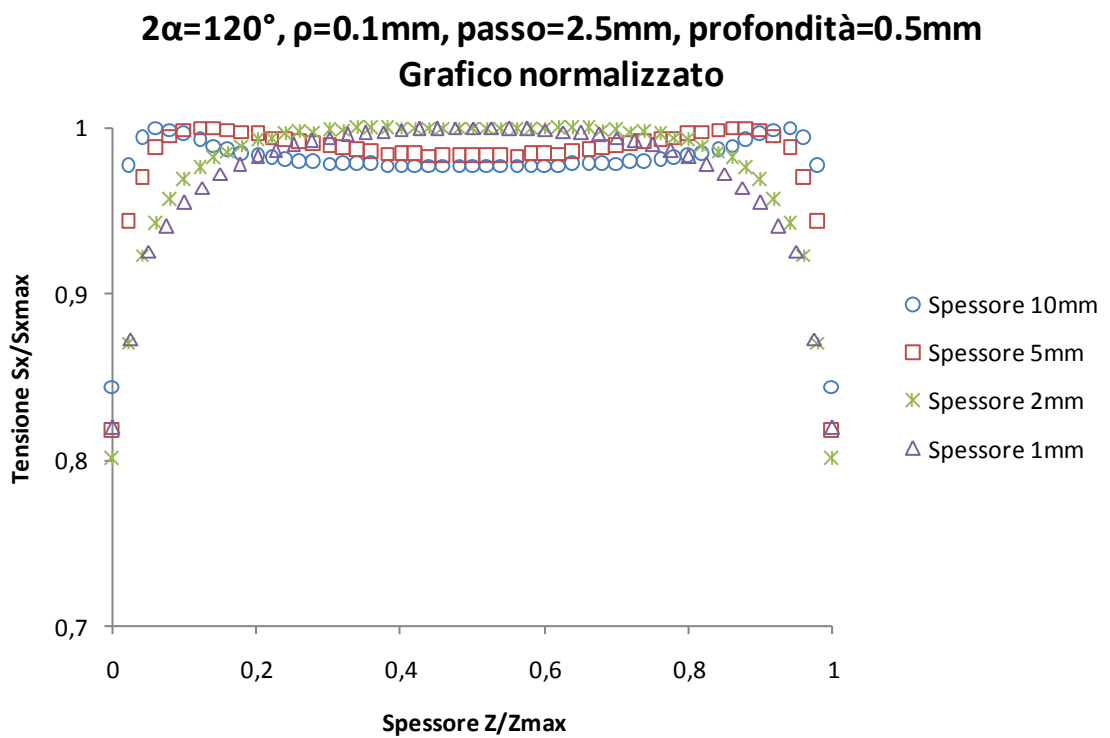
#### 4.4 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm

Nella geometria analizzata si mantengono costanti tutte le dimensioni geometriche principali, cioè angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$ , il raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , il passo  $p=2.5\text{mm}$ , la profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ , variando lo spessore della piastra passando da 5mm a 2mm. Analogamente al caso precedente, si va a plottare l'andamento della tensione  $S_x$  sempre all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore e si vuole capire come quest'ultima varia in funzione dello spessore. Il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione lo si è posto pari a 20. Anche in questo caso la tensione presenta un andamento simmetrico lungo lo spessore, ma il tratto piano di tensione massima è più corto rispetto ad avere uno spessore di piastra di 2mm. Si può ribadire e confermare come lo spessore della piastra influenzi l'andamento della tensione  $S_x$ .



## 4.5 Grafico riassuntivo normalizzato

Successivamente, si confrontano i diversi andamenti della tensione in funzione degli spessore analizzati mediante un unico grafico normalizzato il quale presenta, sull'asse delle ascisse il rapporto tra spessore e spessore massimo, mentre sull'asse delle ordinate, il rapporto tra tensione e tensione massima. Si può osservare dal grafico sottostante i diversi andamenti della tensione  $S_x$  al variare dello spessore: nel caso di spessore pari a 10mm e 5mm, si hanno due punti simmetrici lungo lo spessore in prossimità dei bordi della piastra in cui si ha tensione massima, la quale poi presenta un calo nella parte centrale. Diminuendo lo spessore invece, la tensione massima si concentra in mezzeria dello spessore.

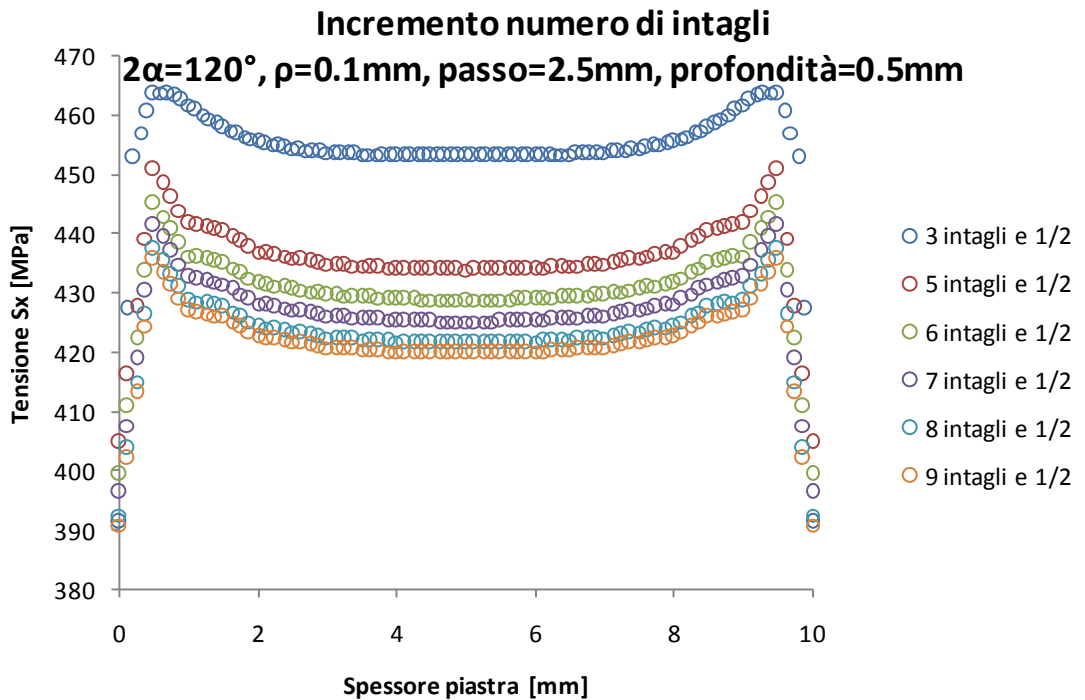


## **4.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE**

Nel modello di piastra iniziale erano presenti tre intagli e mezzo: si vuole analizzare come varia la medesima tensione  $S_x$  andando a plottare l'andamento della tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore incrementando progressivamente il numero degli intagli per tutti gli spessori precedentemente presi in esame. Si modella solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra, sfruttando la simmetria. Si incrementa il numero degli intagli fino a quando la tensione  $S_x$  non assuma un valore pressoché costante.

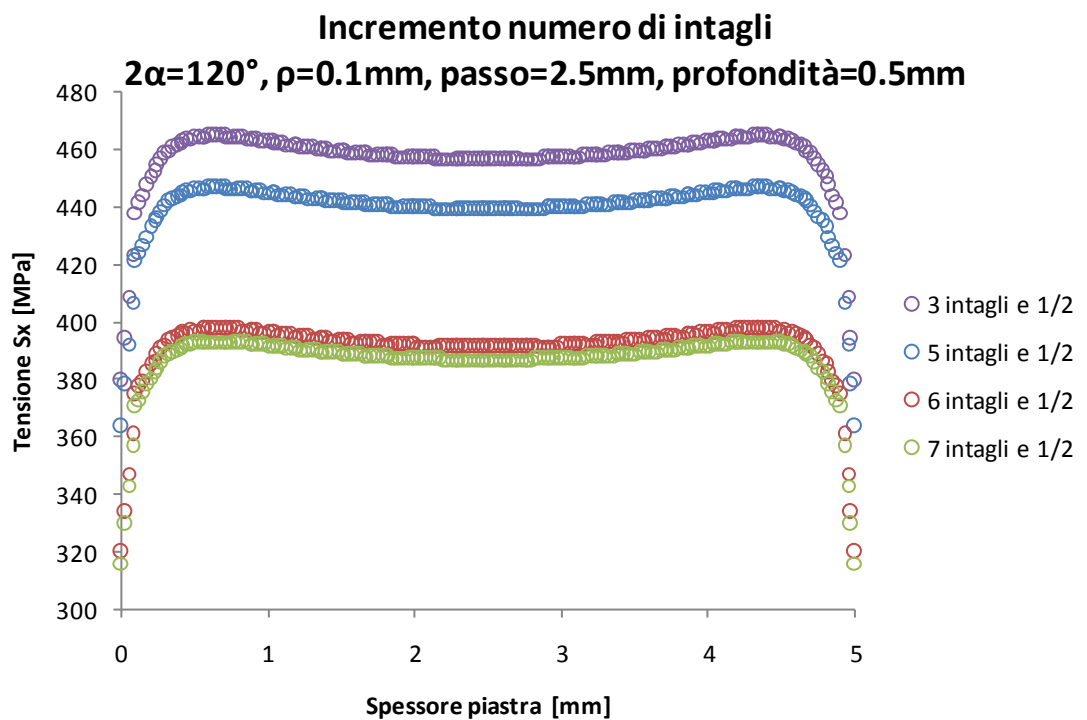
#### 4.6.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, mantenendo lo stesso andamento, fino ad un valore compreso tra 440÷430 MPa. Dal grafico si può osservare che l'andamento delle tensioni non è regolare: dalle simulazioni precedenti si è constatato che i valori assunti dalla tensione  $S_x$  sono indipendenti dal numero di suddivisioni al momento dell'estrusione. Il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione serve solamente per rendere più regolare l'andamento della tensione. Siccome l'obiettivo è di capire dopo quanti intagli presenti sulla piastra la tensione  $S_x$  arriva a convergenza, per velocizzare i modelli, il numero di suddivisioni al momento dell'estrusione lo si è minimizzato, consapevoli del fatto che l'andamento della tensione in funzione dello spessore sia irregolare.



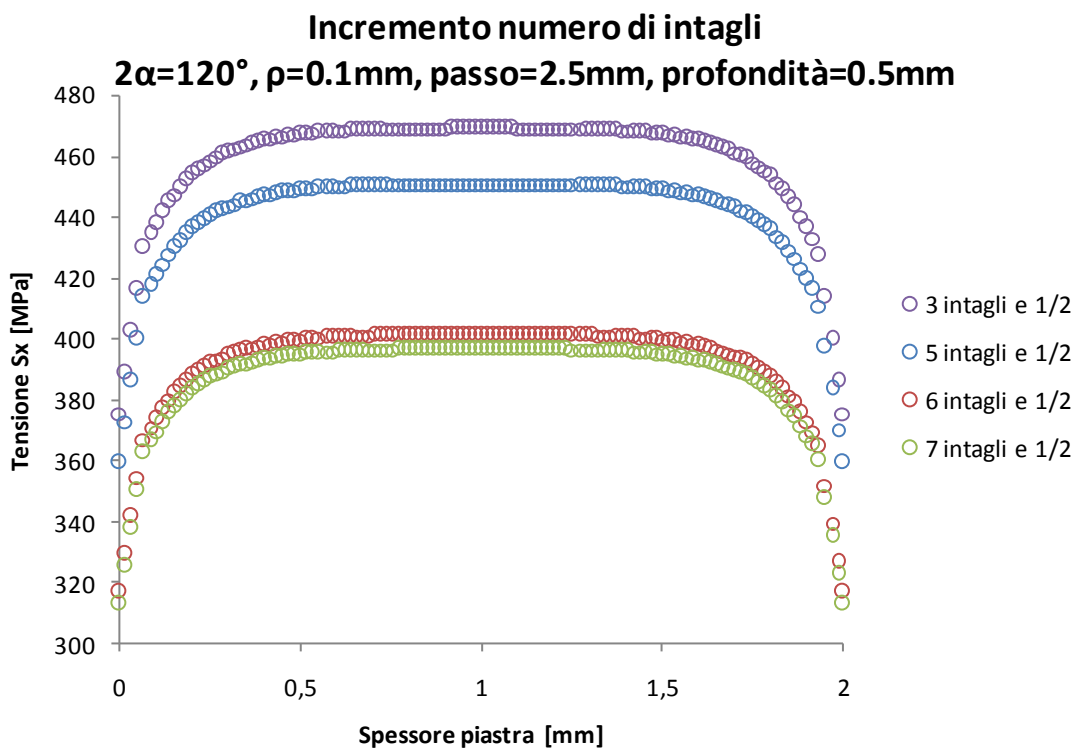
#### 4.6.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, mantenendo lo stesso andamento, fino ad un valore compreso tra 390÷400 MPa.



#### 4.6.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm

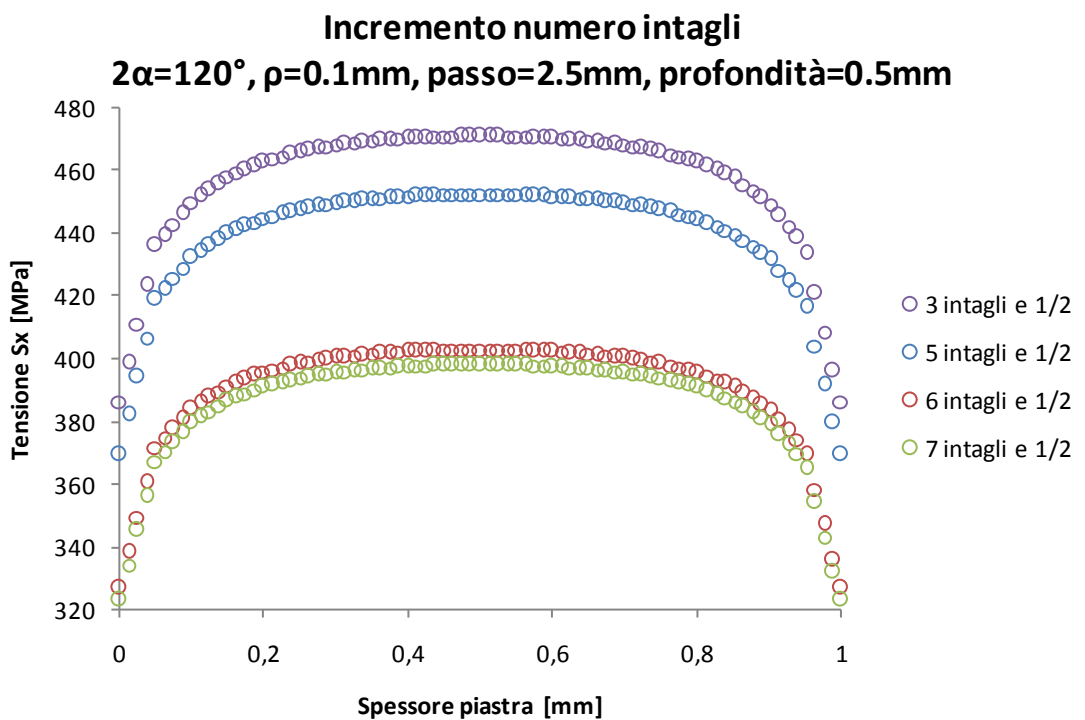
Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, mantenendo lo stesso andamento, fino ad un valore massimo di 390MPa.





#### 4.6.4 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0.1\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità  $t=0.5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 1mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisca progressivamente, mantenendo lo stesso andamento, fino ad un valore compreso tra 390÷400MPa.





## 5. MODELLO 4: $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$

Si è costruito un nuovo modello cambiando il raggio all'apice dell'intaglio, ponendolo pari ad 1mm. Cambiando il raggio all'apice dell'intaglio, per mantenere gli stessi rapporti geometrici  $\rho/t$  e  $t/p$ , necessariamente si è costretti a cambiare anche il passo e la profondità dell'intaglio.

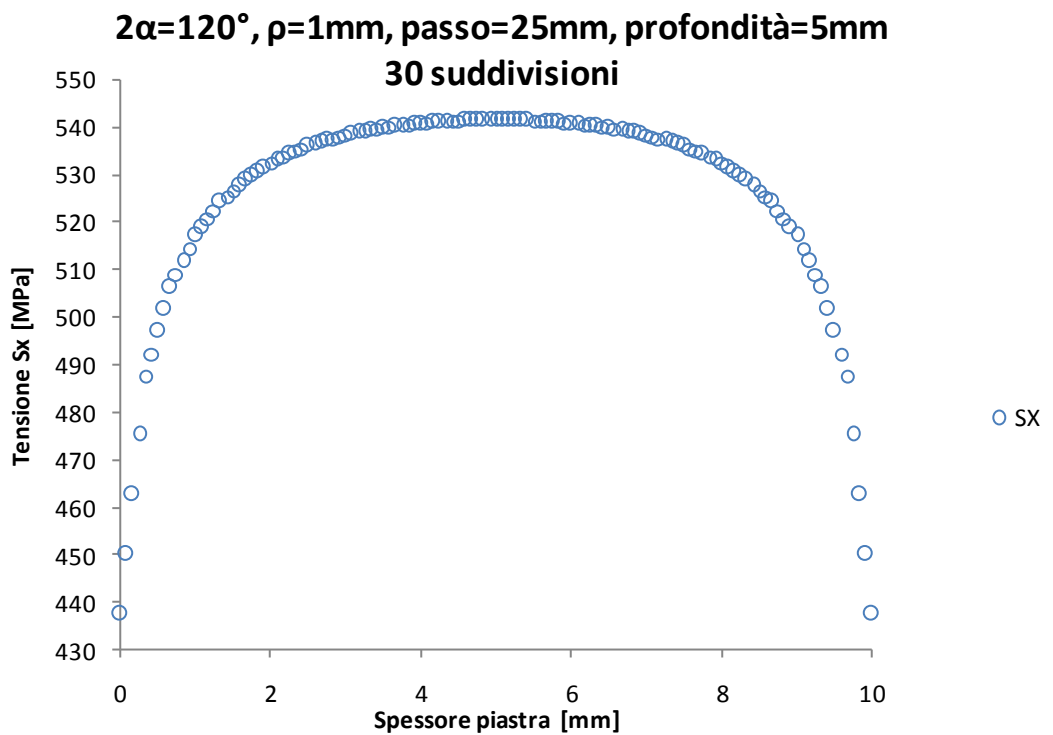
Si ottengono così i seguenti valori per il passo e la profondità dell'intaglio:

$$\frac{\rho}{t} = 0,2 \quad \rightarrow \quad t = 5\text{mm}$$
$$\frac{t}{p} = 0,2 \quad \rightarrow \quad p = 25\text{mm}$$

Nelle simulazioni svolte, l'obiettivo è quello di plottare l'andamento della tensione  $S_x$  all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, in funzione dei diversi spessori di piastra presi in esame, rispettivamente quest'ultimi pari a 10mm, 5mm, 2mm, 1mm. Successivamente, per gli spessori considerati, si aumentano progressivamente sulle piastre il numero degli intagli fino a quando la tensione massima  $S_x$  non assuma un valore pressochè costante.

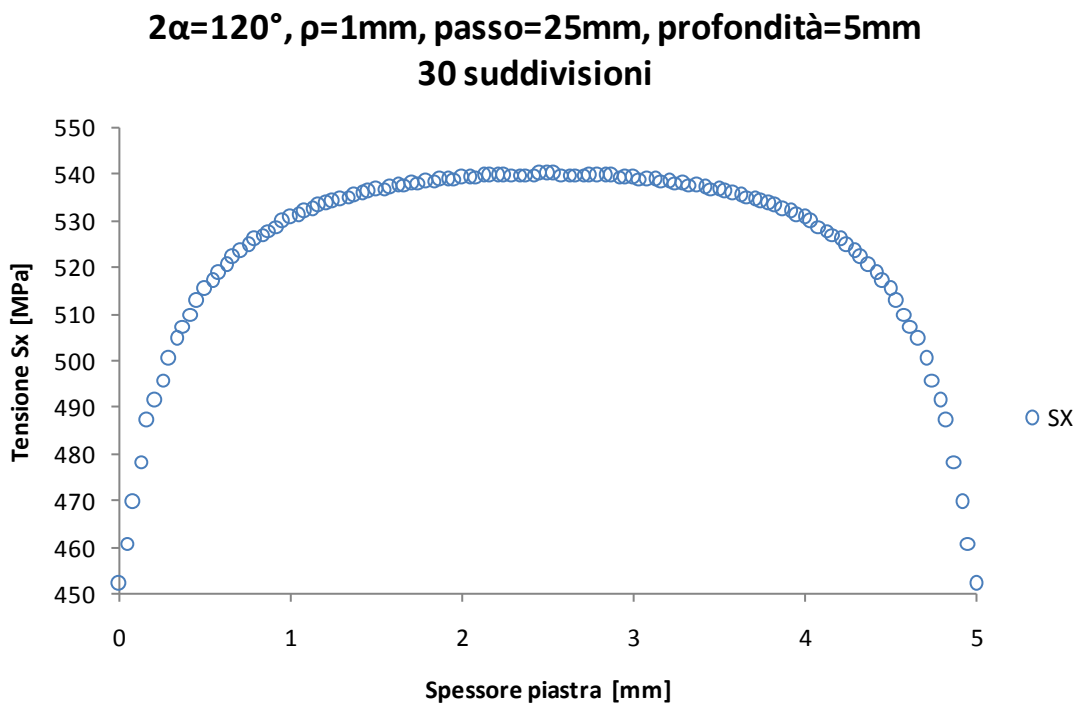
### 5.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm

Nella geometria analizzata, si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm. Il grafico sottostante mostra il diverso andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezzeria della piastra pari a circa 540MPa.



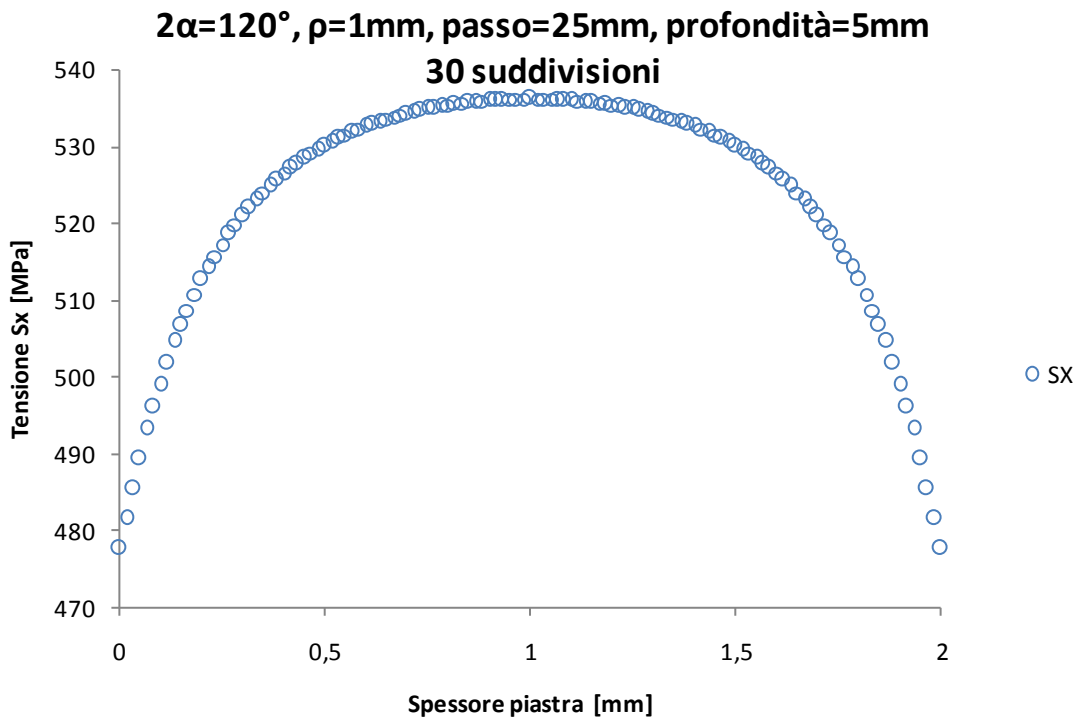
## 5.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm

Nella geometria analizzata, si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 5mm. Il grafico sottostante mostra il diverso andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Anche in questo caso si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezziera della piastra pari a circa 540MPa.



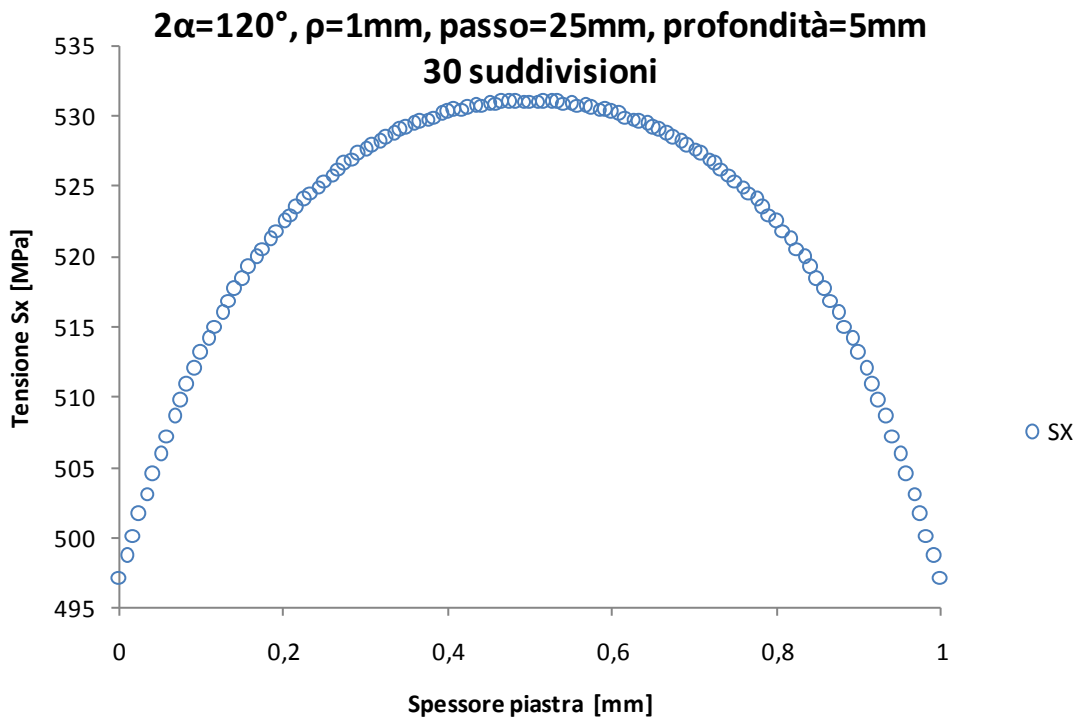
### 5.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm

Nella geometria analizzata, si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 2mm. Il grafico sottostante mostra il diverso andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 30. Anche in questo caso si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezziera della piastra pari a circa 535MPa.



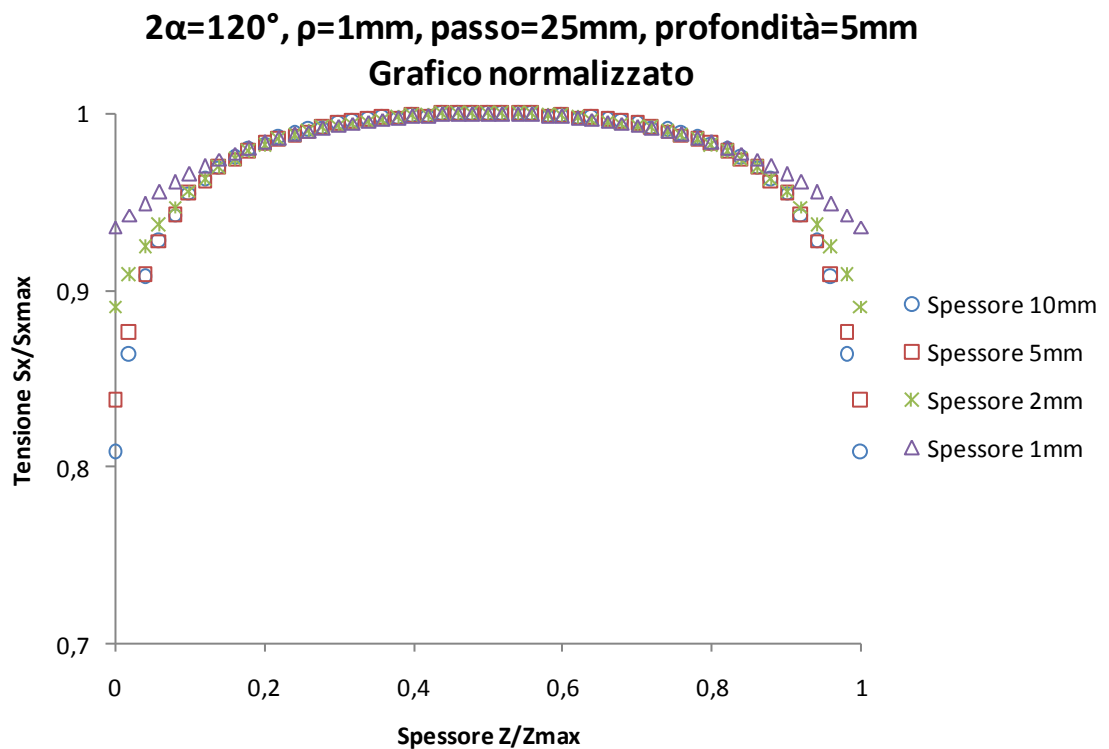
#### 5.4 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm

Nella geometria analizzata, si sono fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a  $1\text{mm}$ . Il grafico sottostante mostra il diverso andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore  $S$  plottata all'apice dell'intaglio in prossimità dell'asse di simmetria avendo impostato, al momento dell'estrusione, un numero di suddivisioni lungo lo spessore pari a 20. Anche in questo caso si può osservare come la tensione  $S_x$  presenti un andamento simmetrico in funzione dello spessore con il valore massimo in mezziera della piastra pari a circa  $530\text{MPa}$ .



## 5.5 Grafico riassuntivo normalizzato

Successivamente, si confrontano i diversi andamenti della tensione in funzione degli spessore analizzati mediante un unico grafico normalizzato il quale presenta, sull'asse delle ascisse il rapporto tra spessore e spessore massimo, mentre sull'asse delle ordinate, il rapporto tra tensione e tensione massima. Si può osservare dal grafico sottostante i diversi andamenti della tensione  $S_x$  al variare dello spessore: per tutti i modelli, avendo un raggio all'apice dell'intaglio pari a 1mm, la tensione massima si concentra in mezzeria delle piastre e, il suo andamento, è molto simile per tutti i modelli analizzati, nonostante si diminuisca lo spessore.



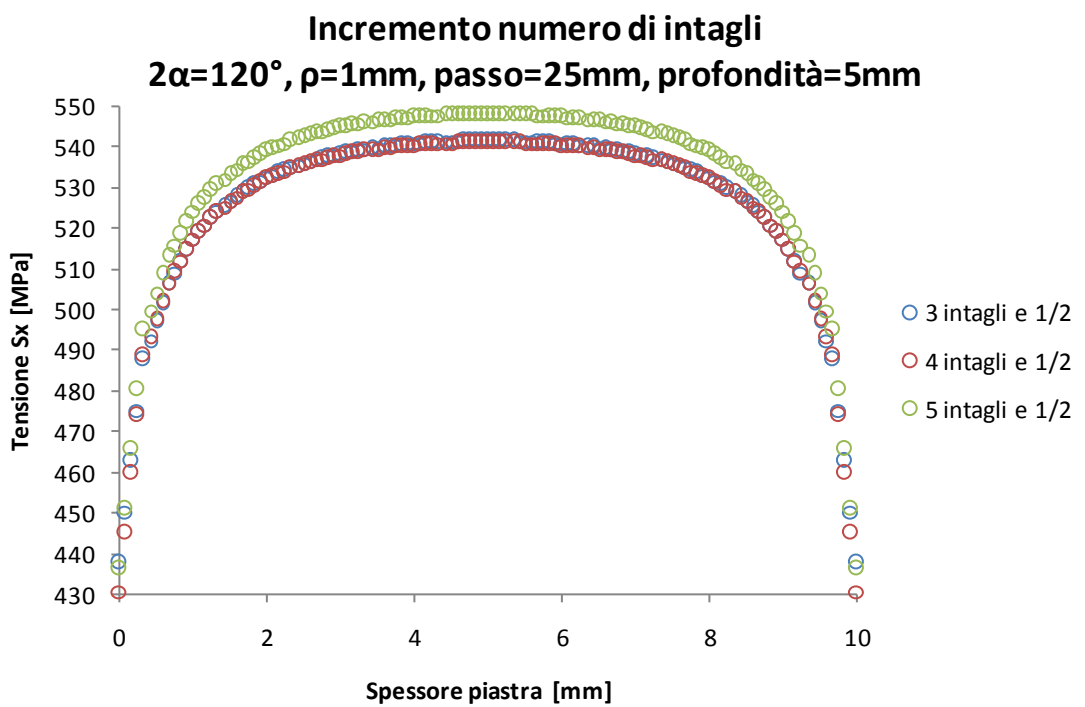


## **5.6 INCREMENTO DEL NUMERO DEGLI INTAGLI NELLE PIASTRE ANALIZZATE**

Nel modello di piastra iniziale erano presenti tre intagli e mezzo: si vuole analizzare come varia la medesima tensione  $S_x$  andando a plottare l'andamento della tensione all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria lungo lo spessore incrementando progressivamente il numero degli intagli per tutti gli spessori precedentemente presi in esame. Si modella solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra, sfruttando la simmetria. Si incrementa il numero degli intagli fino a quando la tensione  $S_x$  non assuma un valore pressochè costante.

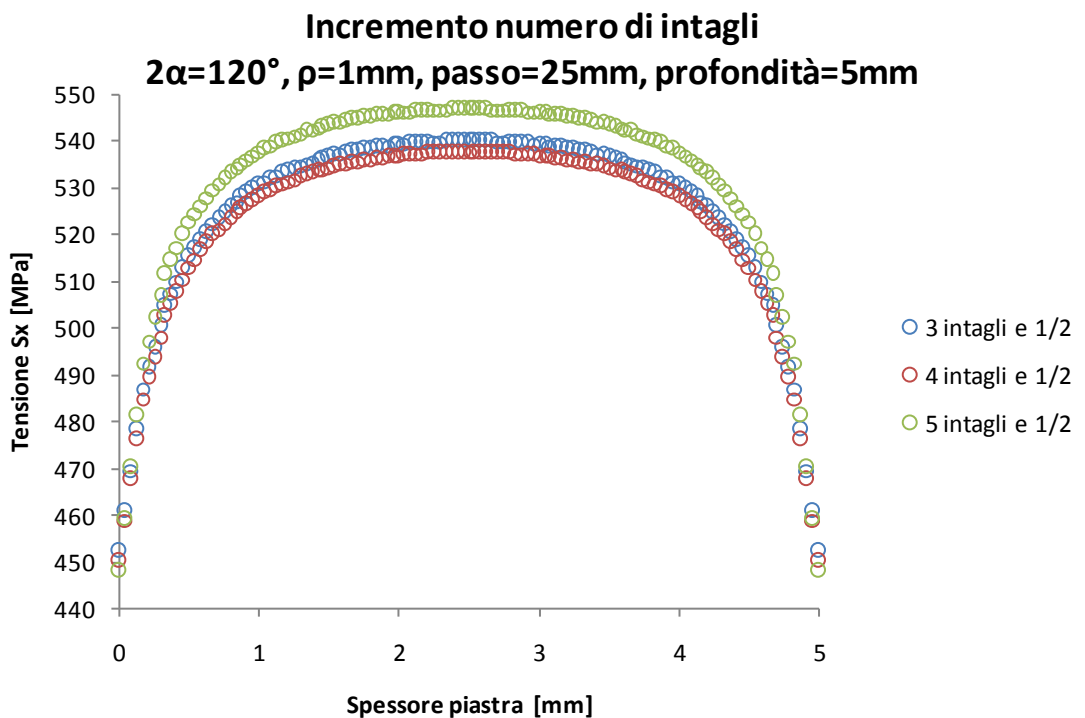
### 5.6.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 10mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Si può osservare come la tensione diminuisce passando da 3 a 4 a 5 intagli, fino a convergenza, con un valore massimo pari a 540MPa.



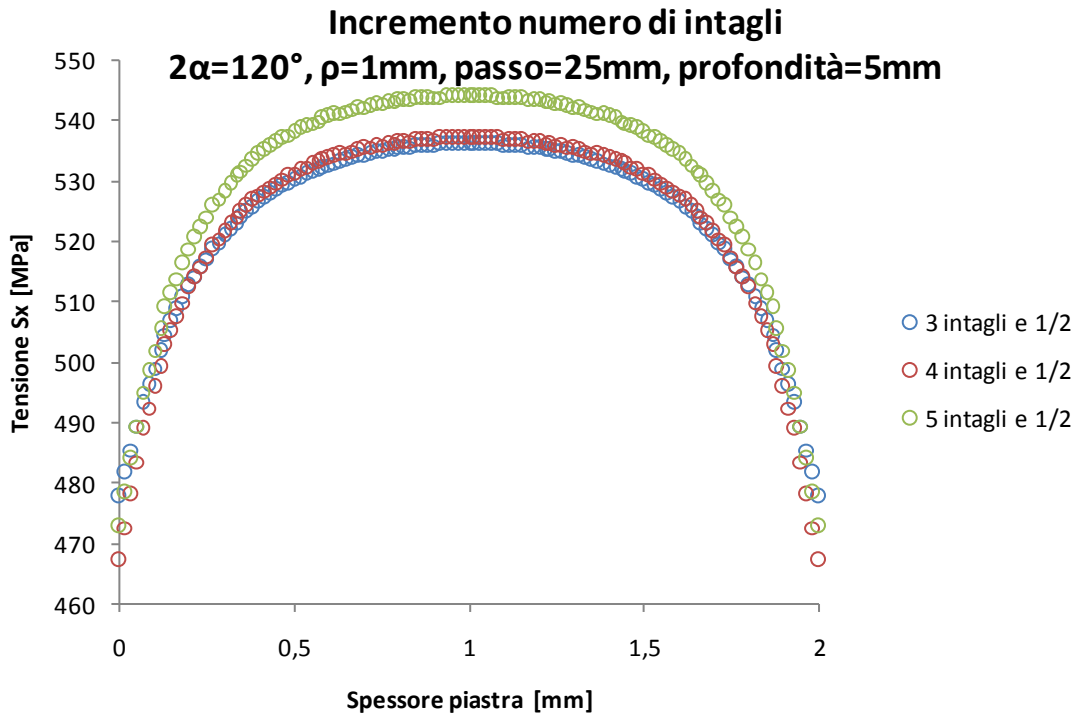
### 5.6.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 5mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$  ed uno spessore della piastra pari a 10mm, la figura sottostante mette a confronto i valori che la tensione  $S_x$  assume aumentando progressivamente il numero degli intagli. Dal grafico sottostante si può osservare come la tensione massima rimanga pressoché costante passando da 3 intagli e mezzo a 4 e mezzo sulla piastra. Continuando ad aumentare il numero di intagli, anziché diminuire come ci si aspetterebbe, la tensione aumenta, ma questo è dovuto ad un problema numerico sul modello: per far sì che i risultati siano corretti, cioè che la tensione diminuisca incrementando il numero di intagli, bisognerebbe triplicare il numero di elementi, però il modello risulterebbe pesantissimo e impiegherebbe molto tempo a fornire la soluzione.



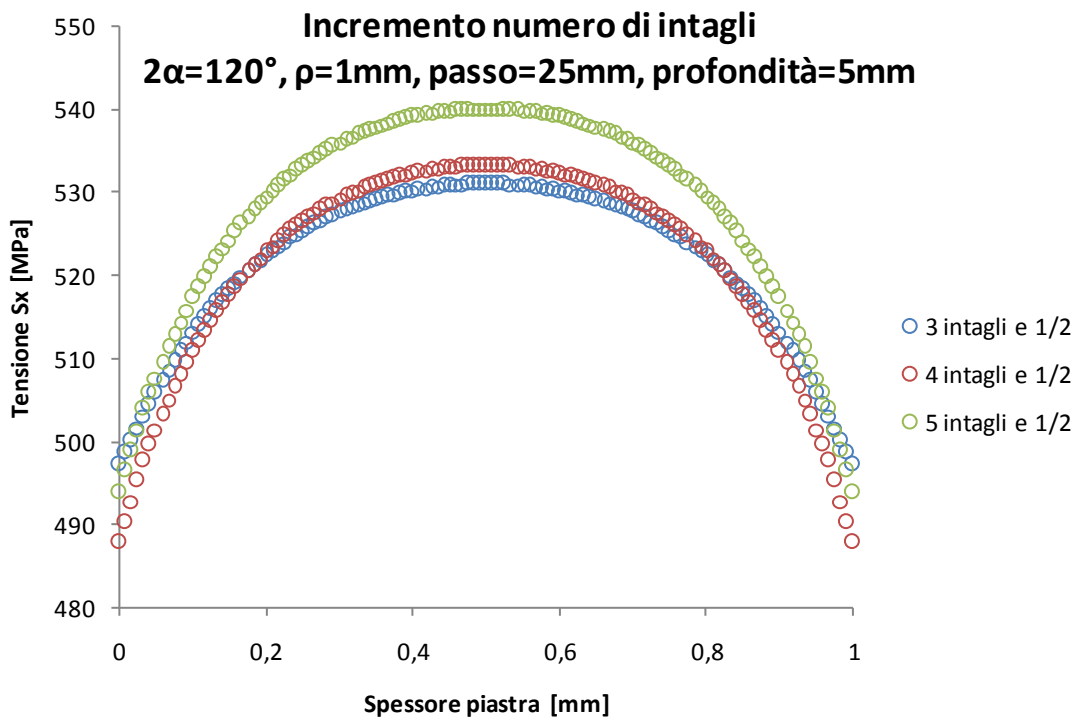
### 5.6.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 2mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$ , si procede analogamente aumentando progressivamente il numero di intagli anche per la piastra di spessore di 2mm. Il grafico sottostante, mette a confronto i diversi andamenti della tensione lungo lo spessore all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria: anche in questo caso la tensione  $S_x$  rimane pressochè costante in presenza di 4 intagli e mezzo sul quarto di piastra modellando poi, anziché diminuire come ci si aspetterebbe, aumenta, ma questo è dovuto ad un problema numerico sul modello.



#### 5.6.4 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=1\text{mm}$ , $p=25\text{mm}$ , $t=5\text{mm}$ , spessore 1mm

Fissati i seguenti parametri geometrici: angolo di apertura  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice dell'intaglio  $\rho=1\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=25\text{mm}$ , profondità  $t=5\text{mm}$ , si procede analogamente aumentando progressivamente il numero di intagli anche per la piastra di spessore di 1mm. Il grafico sottostante, mette a confronto i diversi andamenti della tensione lungo lo spessore all'apice dell'intaglio sull'asse di simmetria: anche in questo caso la tensione  $S_x$  rimane pressochè costante a 4 intagli e mezzo sul quarto di piastra modellado poi, anzichè diminuire come ci si aspetterebbe, aumenta, ma questo è dovuto ad un problema numerico sul modello.





## 6. RAGGIO ALL'APICE DELL'INTAGLIO PARI A ZERO: FATTORE DI INTENSIFICAZIONE DELLE TENSIONI $K_I$

Con raggio all'apice dell'intaglio pari a zero, non si ragiona in termini di fattore di concentrazione delle tensioni  $K_t$ , ma di fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$ .

Il fattore di concentrazione delle tensioni è descritto dalla seguente formula:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

Per determinare la tensione all'estremità di una cricca trasversale, è sufficiente far tendere a zero il raggio all'apice  $\rho$ : si osserva che  $K_t$  va ad infinito. In teoria questo fenomeno dovrebbe provocare la propagazione immediata della cricca a causa della progressiva rottura delle zone dove  $\sigma > \sigma_r$ . Tuttavia, nei materiali reali, il valore di tensione infinito non può essere raggiunto e, sperimentalmente, si osserva che essi possono resistere alla presenza di un difetto purché la tensione  $\sigma_0$  si mantenga sufficientemente bassa. Nel caso di piastra spessa, il materiale nelle vicinanze dell'apice, soggetto a tensioni più basse rispetto a quello in prossimità dell'apice stesso, si oppone alla contrazione di quest'ultimo e tende a generare uno stato di deformazione piana con  $\varepsilon_z=0$  e una tensione  $\sigma_z=0$ . Si introduce così il fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$ , dato dalla definizione di Gross e Mendelson:

$$K_I = \sigma_x S^{(1-\lambda_1)} \sqrt{2\pi}$$

Il fattore di intensificazione delle tensioni è pari a :

$\sigma_x$  : è la tensione data dal programma di calcolo agli elementi finiti ANSYS, corrispondente alla  $S_x$  [MPa].

$S$  : è la distanza in millimetri dall'apice dell'intaglio.

$\lambda_1$ : è l'autovalore associato all'angolo di apertura dell'intaglio. La tabella sottostante elenca i valori che l'autovalore assume al variare dell'angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha$  per sollecitazioni di modo I .

$2\alpha$	$\lambda_1$
0	0.5
$\pi/6$	0.5014
$\pi/4$	0.5050
$\pi/3$	0.5122
$\pi/2$	0.5448
$2\pi/3$	0.6157
$3\pi/4$	0.6736
$5\pi/6$	0.7520

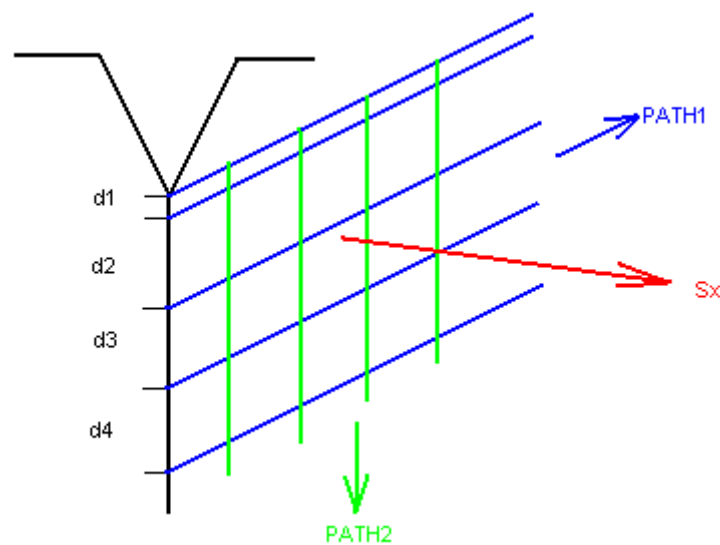
Dalla formula sovrastante si può osservare come il fattore di intensificazione delle tensioni sia funzione della tensione, della distanza dall'apice dell'intaglio la quale, quest'ultima, è elevata per uno meno l'autovalore associato al relativo angolo di apertura dell'intaglio.



## 6.1 OBIETTIVO E PROCEDIMENTO

Nelle esercitazioni svolte, sono presi in esame due modelli aventi raggio all'apice dell'intaglio pari a zero  $\rho=0$  e con due diversi angoli di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$  e  $2\alpha=120^\circ$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ . Si vuole calcolare il fattore di intensificazione delle tensioni in prossimità dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria per diversi spessori di piastra pari a 10, 5, 2, 1mm.

Per il calcolo del fattore di intensificazione delle tensioni, la figura sottostante schematizza le due diverse direzioni di path prese in considerazione: la prima direzione di path (PATH1) permette di plottare, procedendo poi lungo lo spessore, la tensione  $S_x$  posizionandosi a delle opportune distanze dall'apice dell'intaglio; la seconda direzione di path invece (PATH2) permette di plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio, procedendo poi lungo lo spessore.



Nel caso di plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore ad una distanza prefissata dall'apice dell'intaglio (PATH1), comporta che nella formula per il calcolo del fattore di intensificazione delle tensioni la distanza  $S$  lungo lo spessore è costante, in quanto prefissata. Viceversa, plottando la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio (PATH2), nella formula del  $K_I$ , la distanza  $S$  è variabile: pari a zero sull'apice dell'intaglio, aumentando progressivamente lungo la direzione di propagazione. Si ottengono così due diversi grafici: il primo contenente sull'asse delle ordinate il fattore di intensificazione delle tensioni plottando la tensione  $S_x$  a delle opportune distanze dall'apice dell'intaglio, mentre sulle ascisse lo spessore

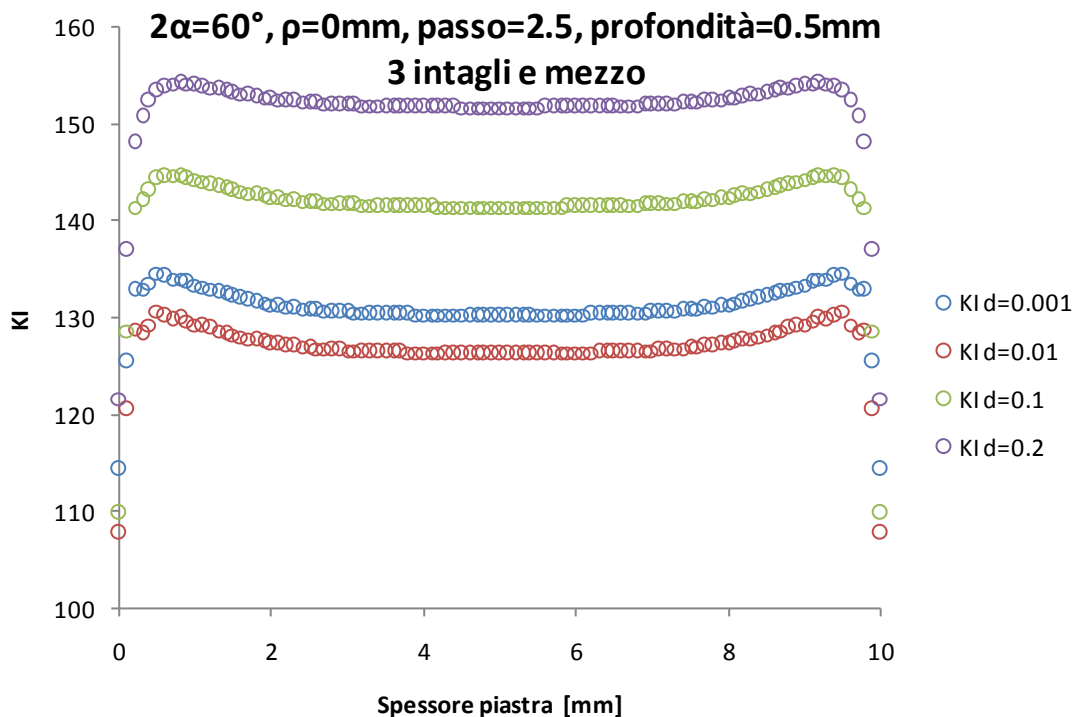
delle piastra; un secondo grafico contenete sull'asse delle ordinate il fattore di intensificazione delle tensioni, mentre sulle ascisse la distanza dall'apice dell'intaglio. In quest'ultimo grafico, si confronta l'andamento del fattore di intensificazione delle tensioni, procedendo lungo lo spessore delle piastra. Infatti, al momento dell'estrusione, si imposta un numero di suddivisioni che dipende poi dall'andamento più o meno regolare della tensione  $S_x$ : se è irregolare, si incrementa il numero di suddivisioni lungo lo spessore fino ad ottenere un andamento il più possibile regolare. Chiaramente, risulterebbe un lavoro laborioso calcolare il fattore di intensificazione delle tensioni per tutte le suddivisioni lungo lo spessore per cui, per semplicità, si parte dal bordo della piastra e si procede per intervalli regolari funzioni del numero di suddivisioni assegnatogli. Ad esempio, se al momento dell'estrusione il numero di suddivisioni è di 40, partendo dal bordo della piastra, si esegue un path ogni quattro suddivisioni, procedendo lungo la direzione di propagazione dell'intaglio fino alla distanza massima fissata a 0.2mm dall'apice, in maniera tale da ritrovarsi perfettamente al centro dello spessore dopo 6 paths. Successivamente, si incrementa il numero di intagli nelle piastre prese in esame calcolando il fattore di intensificazione delle tensione esattamente come nei due casi appena spiegati, fino a quando l'andamento del fattore di intensificazione delle tensioni arriva a convergenza.

## 7. MODELLO 5: $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$

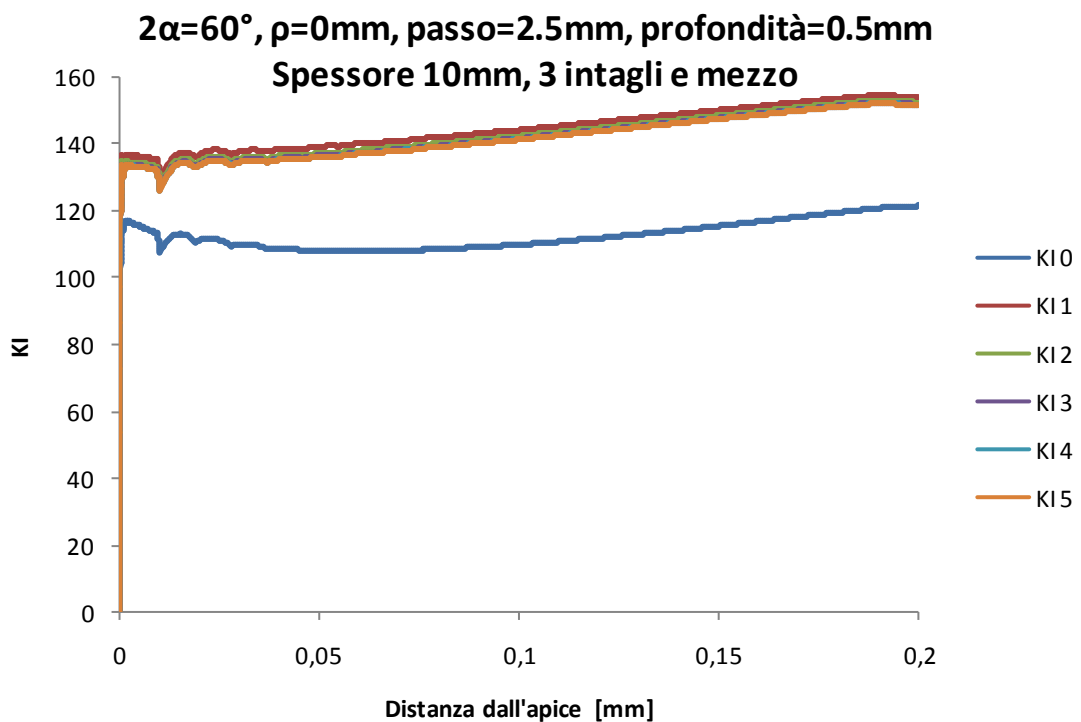
Nella geometria analizzata, le principali dimensioni geometriche della piastra sono le seguenti: angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=60^\circ$ , raggio all'apice  $\rho=0\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ . Per semplificare il modello si è sfruttato il concetto di simmetria, modellando così solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra. Come precedentemente spiegato, si procede plottando la tensione  $S_x$  lungo lo spessore  $a$  delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio, precisamente a 0.001, 0.01, 0.1 e 0.2mm. Successivamente, per ogni distanza, si sono calcolati i rispettivi valori del fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$  prendendo  $\lambda_1$  pari a 0.5122 in quanto è l'autovalore associato ad un angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha$  pari a  $60^\circ$ . Il passo successivo è quello di plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio: in questo caso, nella formula per il calcolo del fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$ , la distanza  $S$  non è più costante, ma è variabile e precisamente parte da zero quando si è all'apice dell'intaglio, via via aumentando più ci si allontana.

### 7.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

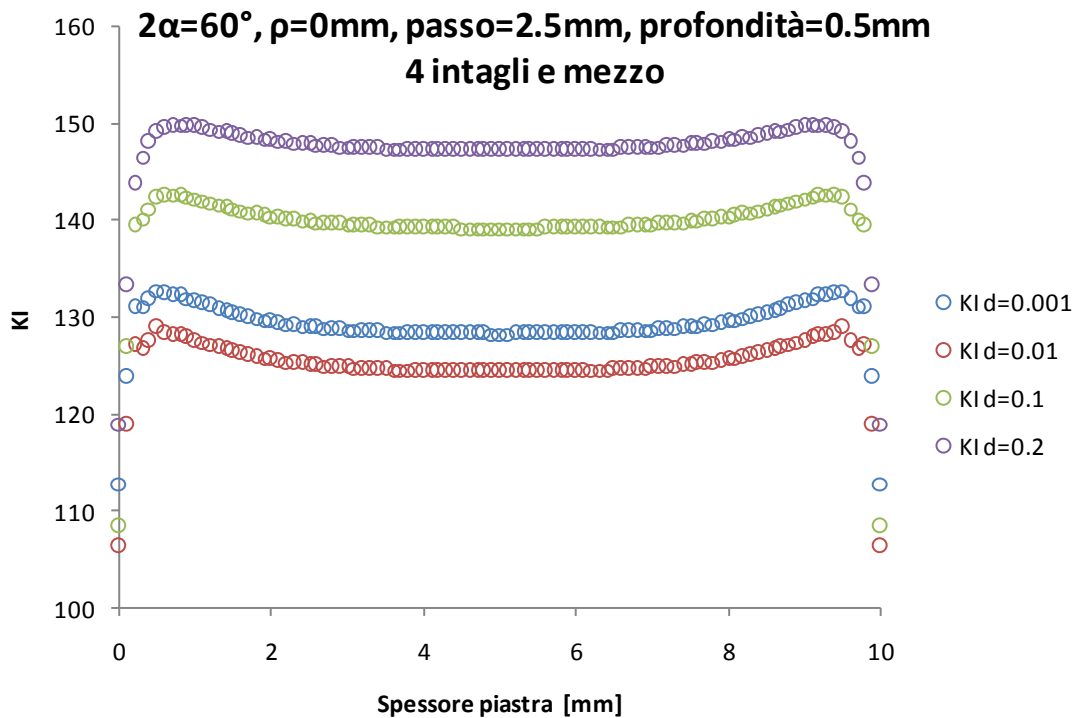


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.

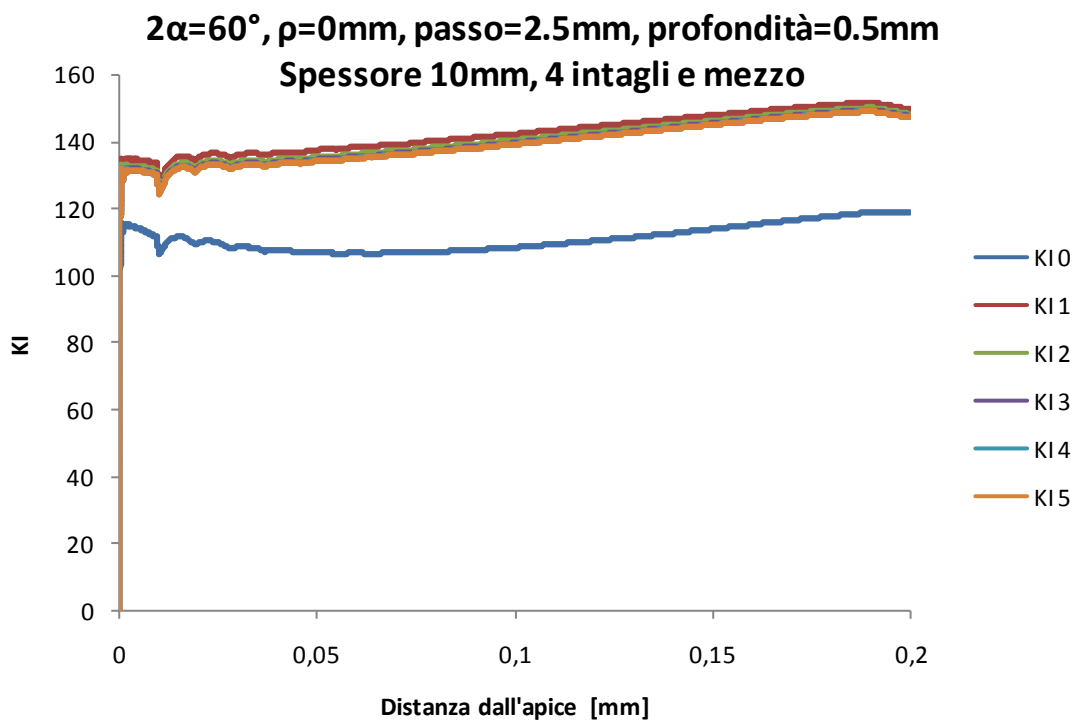


### 7.1.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



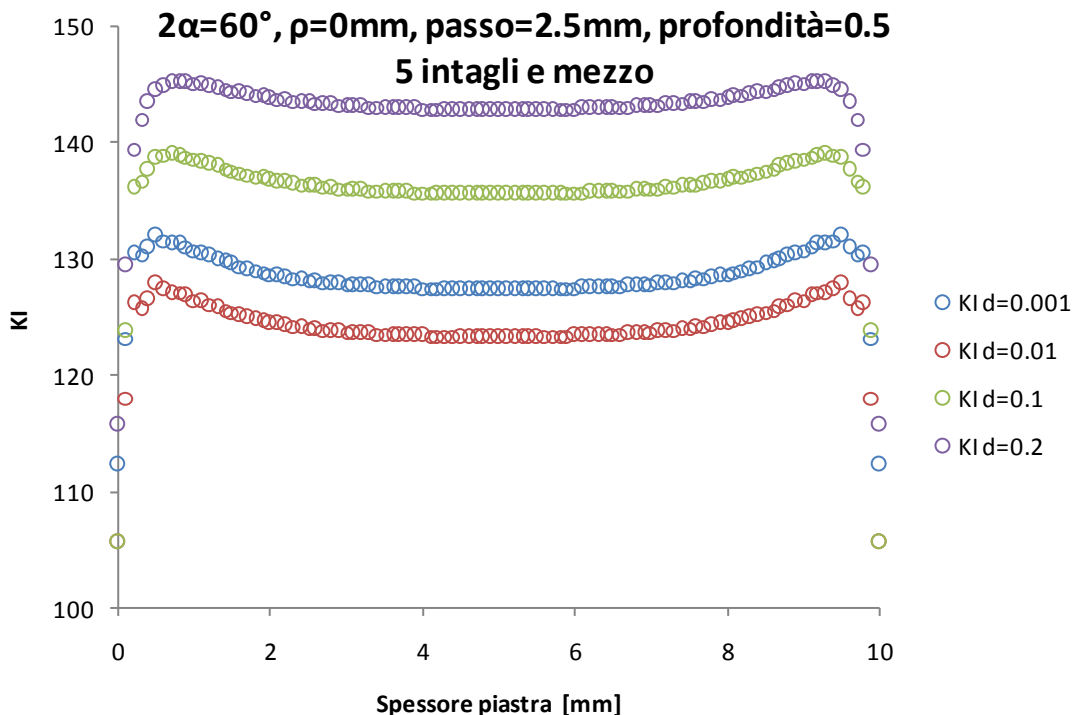
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



### 7.1.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm,

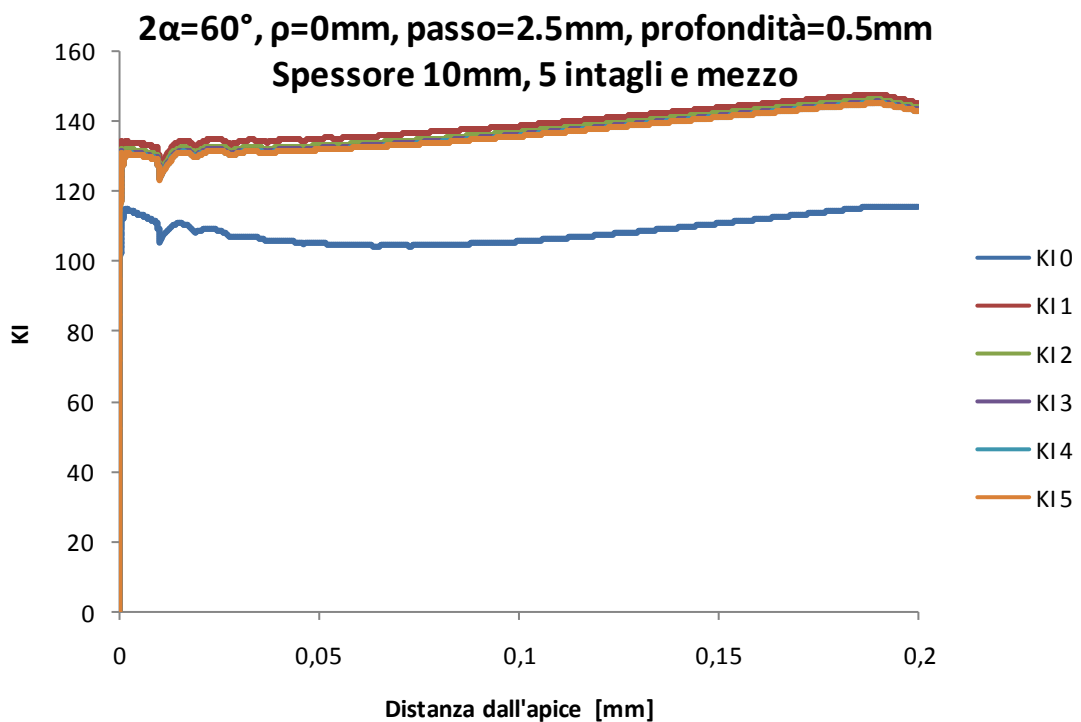
#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



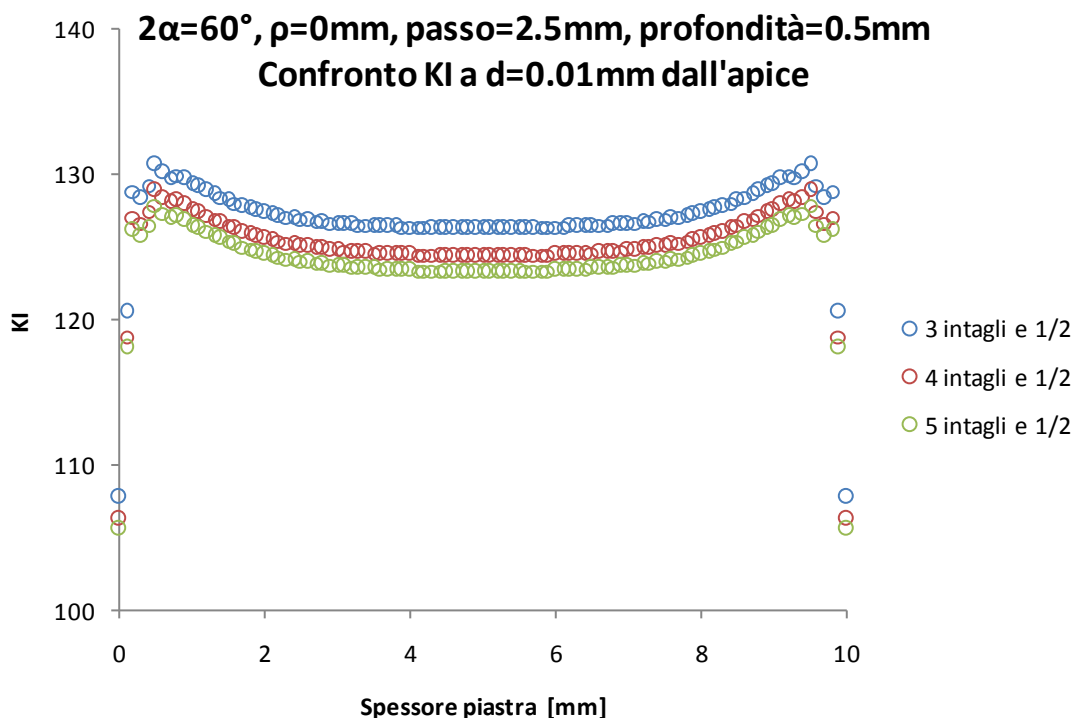


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.

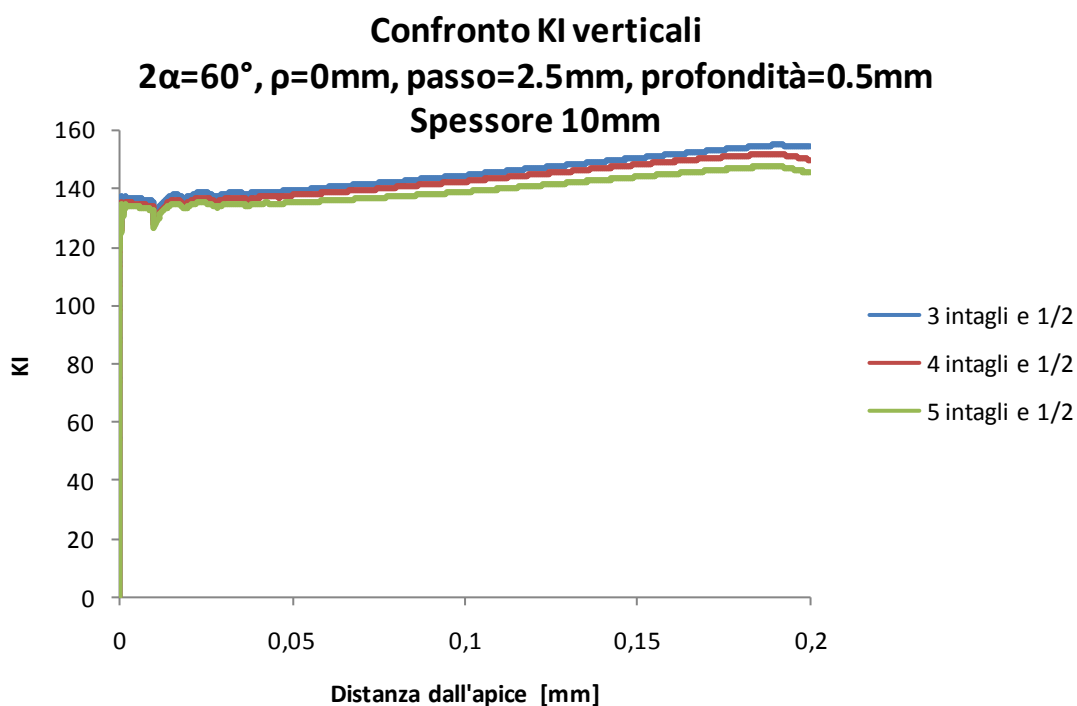


### 7.1.3 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensioni calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore della piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.

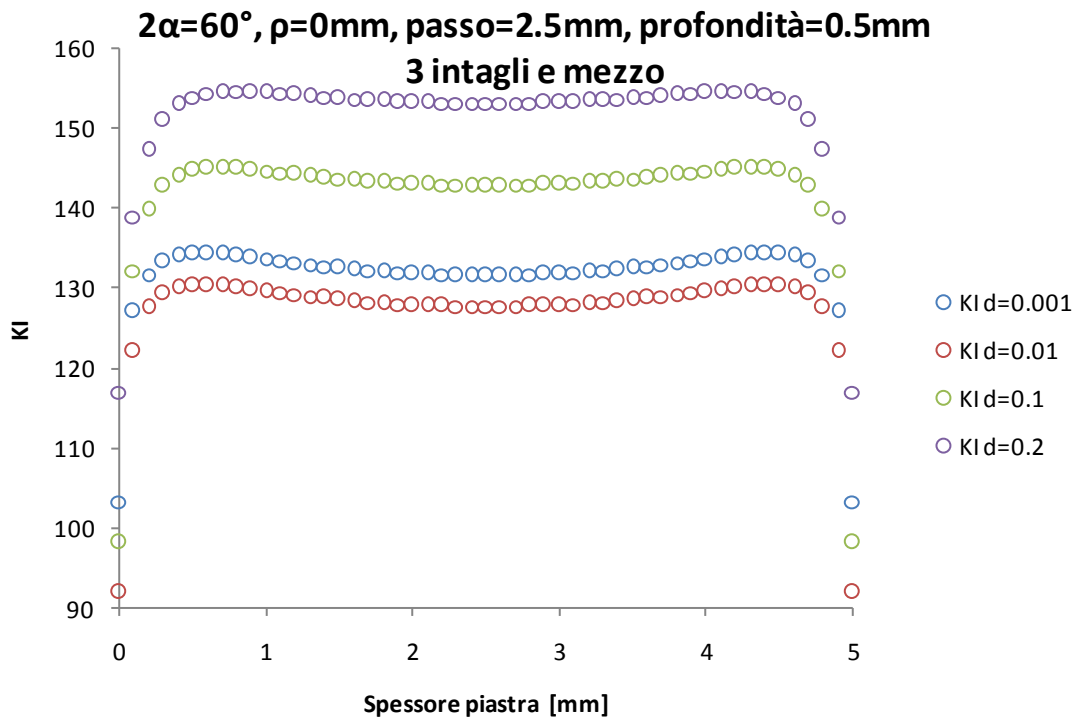


Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$ . Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.

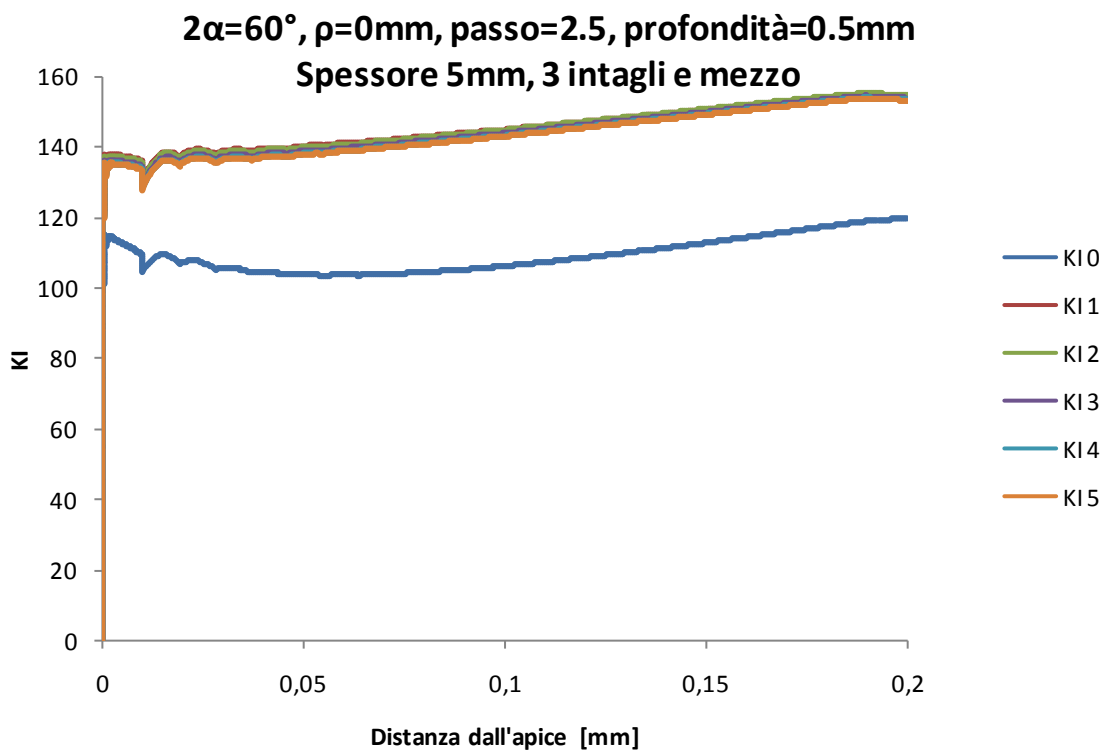


## 7.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

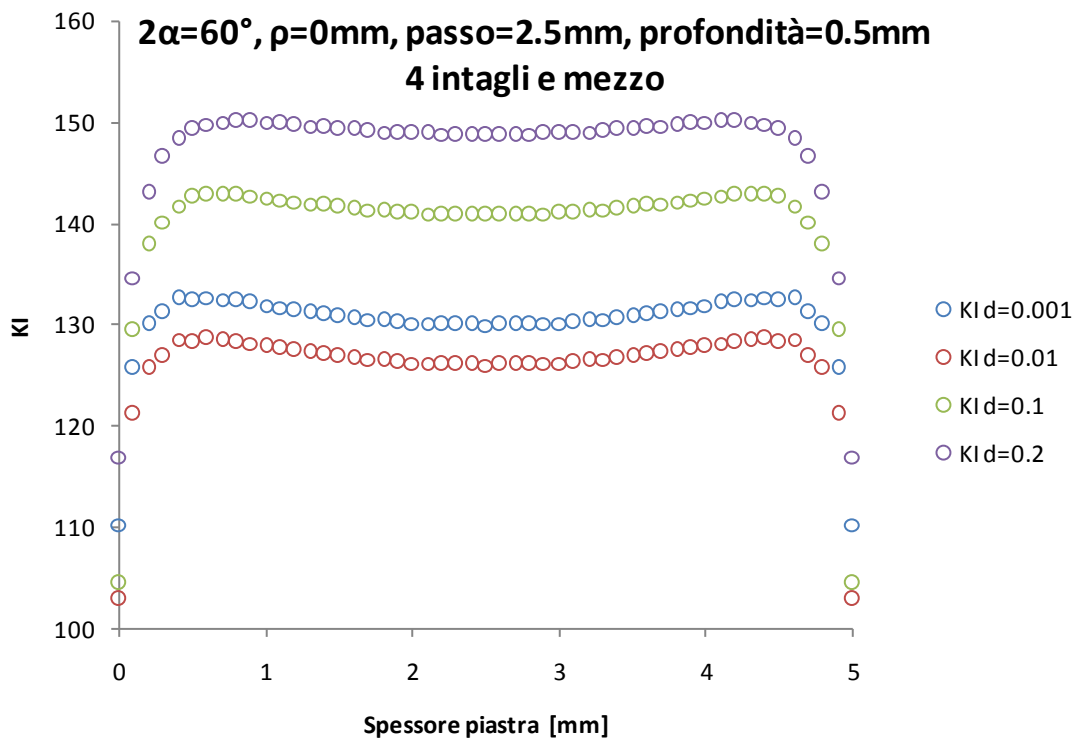


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.

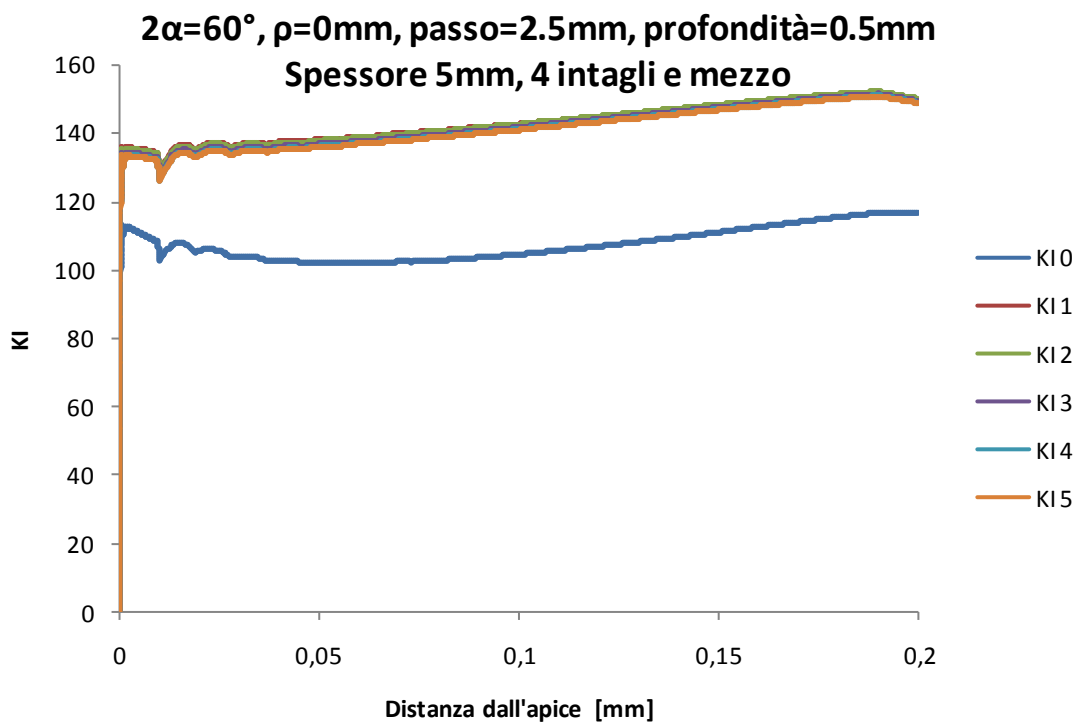


### 7.2.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

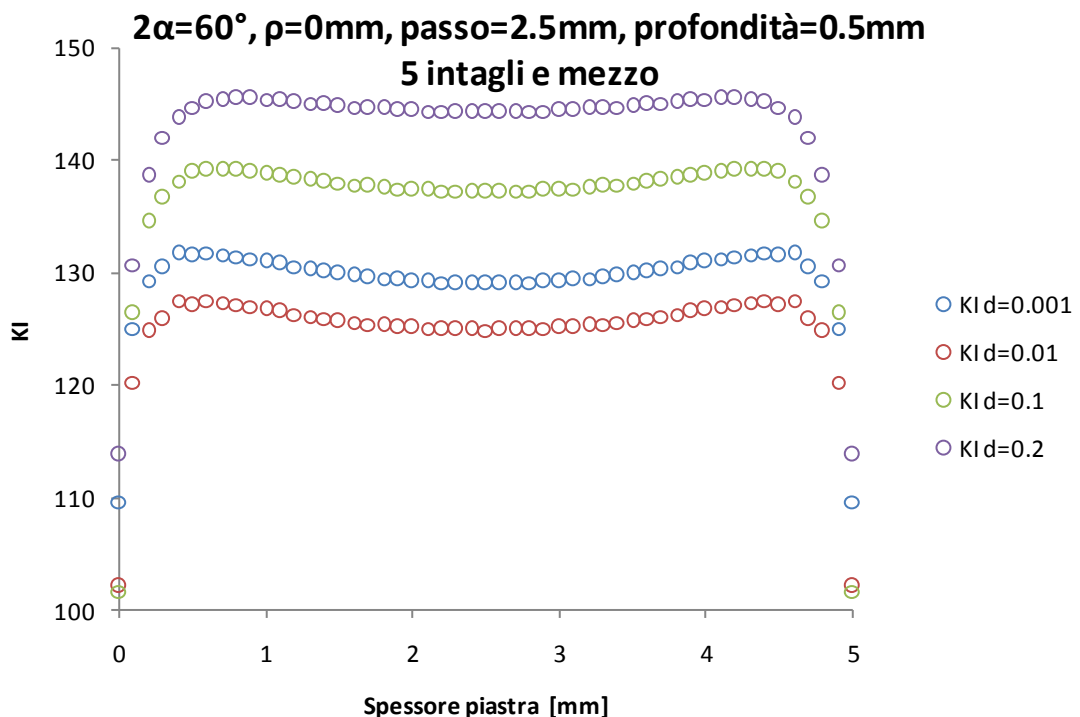


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



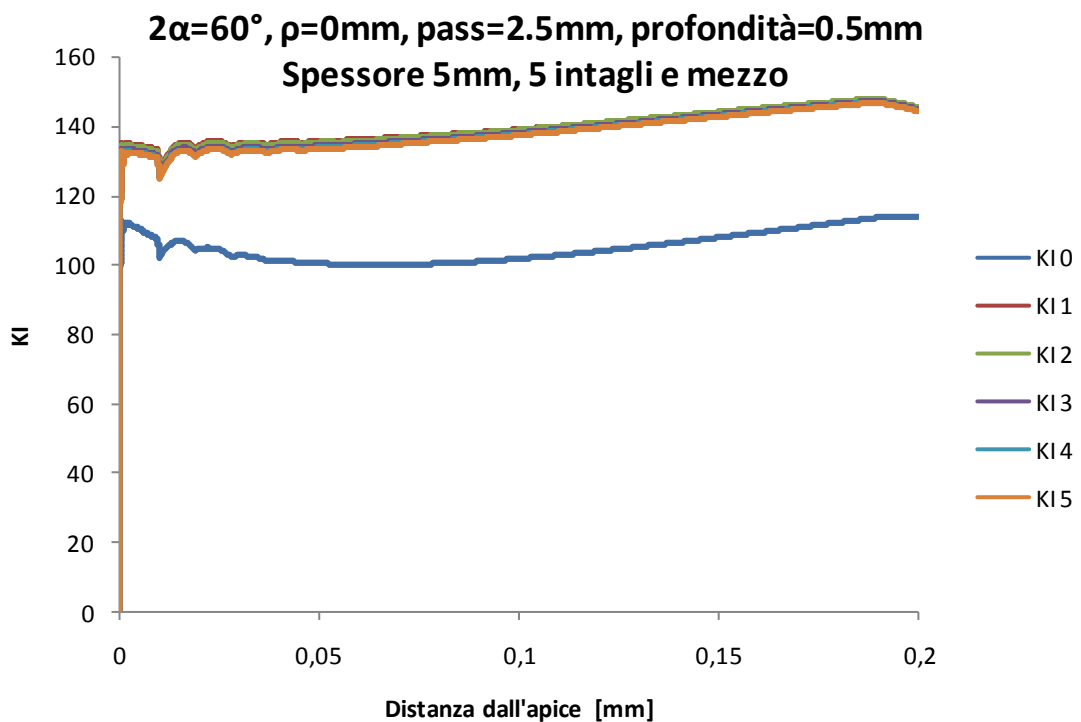
### 7.2.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm, 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



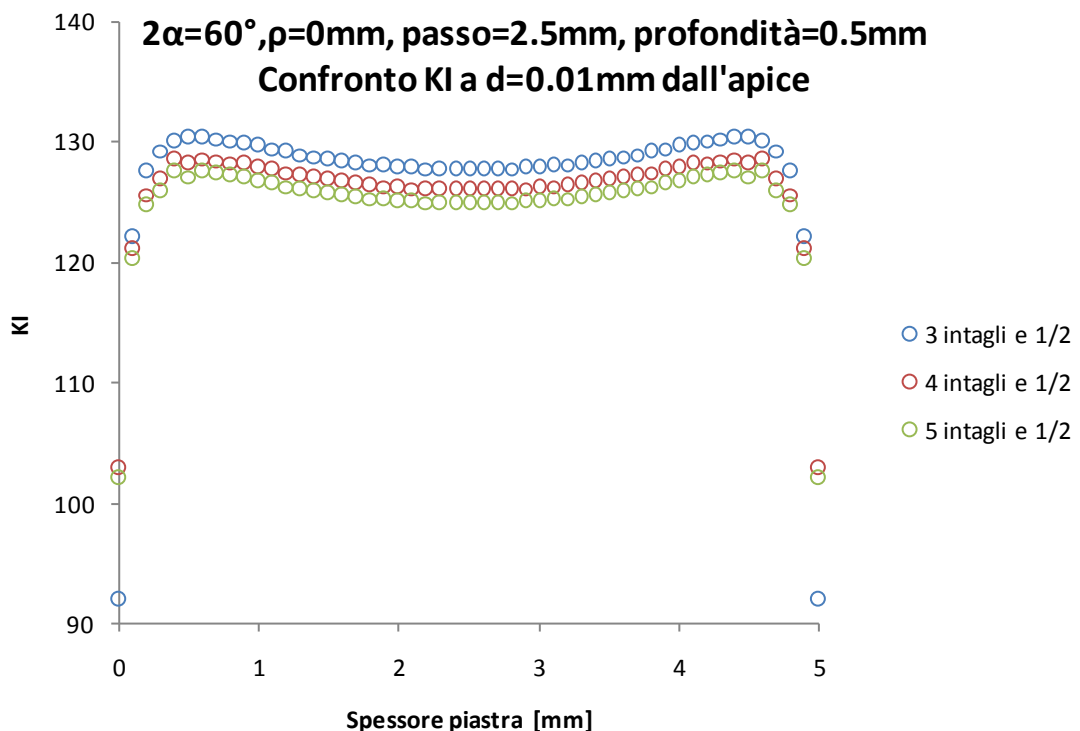


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.

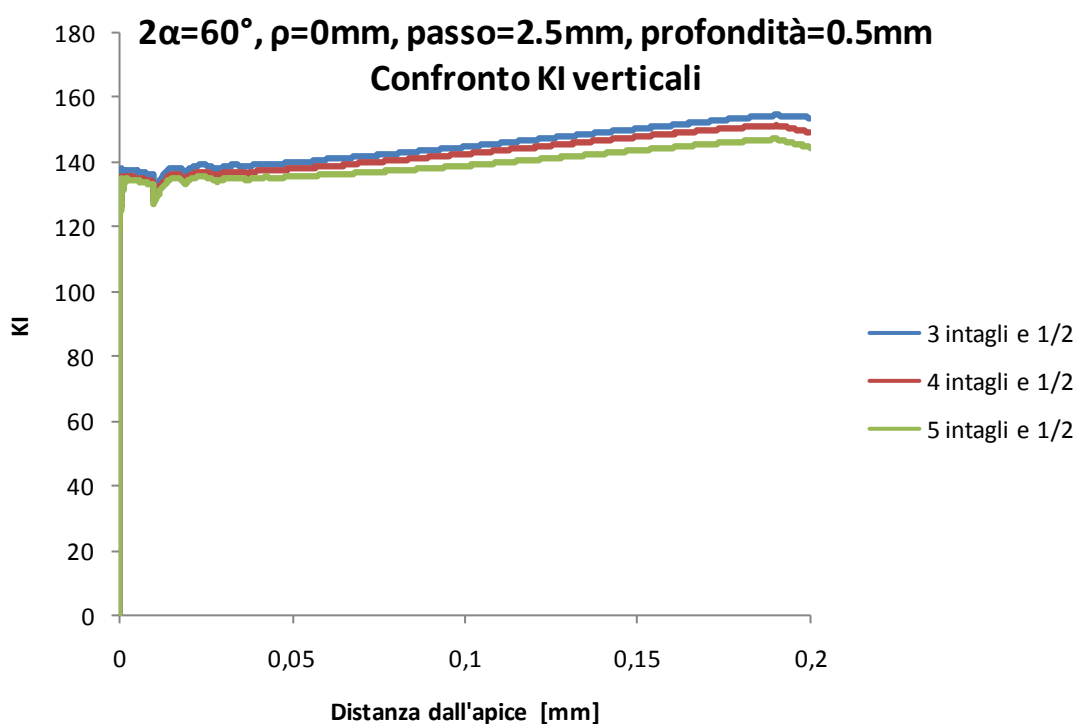


### 7.2.3 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensioni calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore della piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



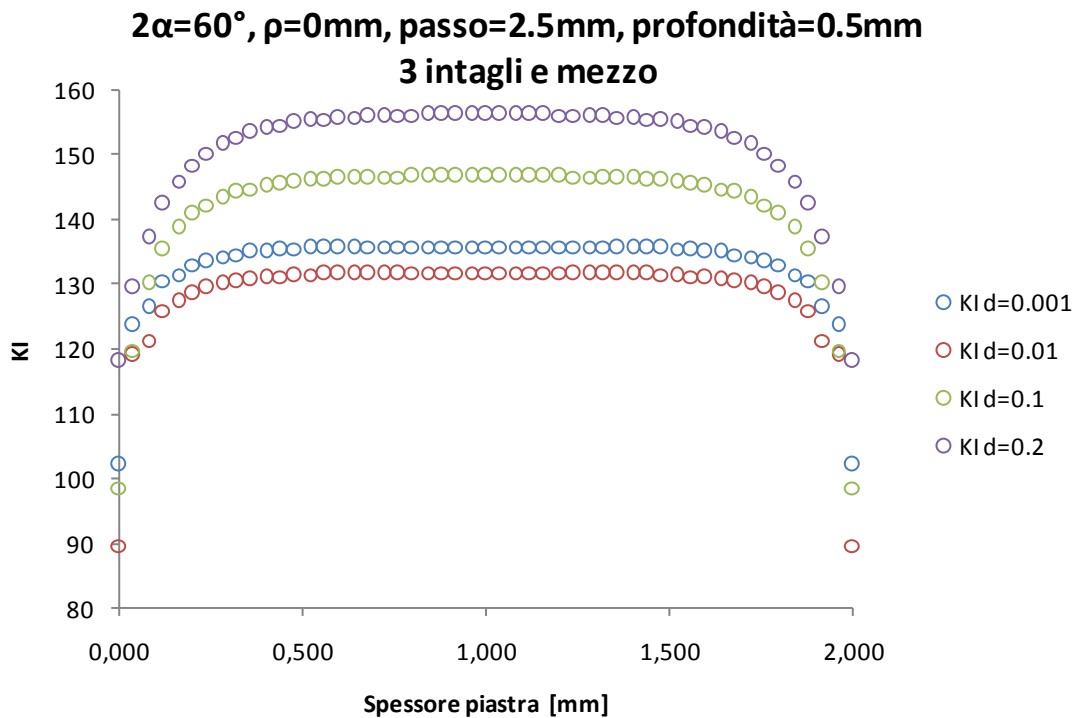
Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$ . Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



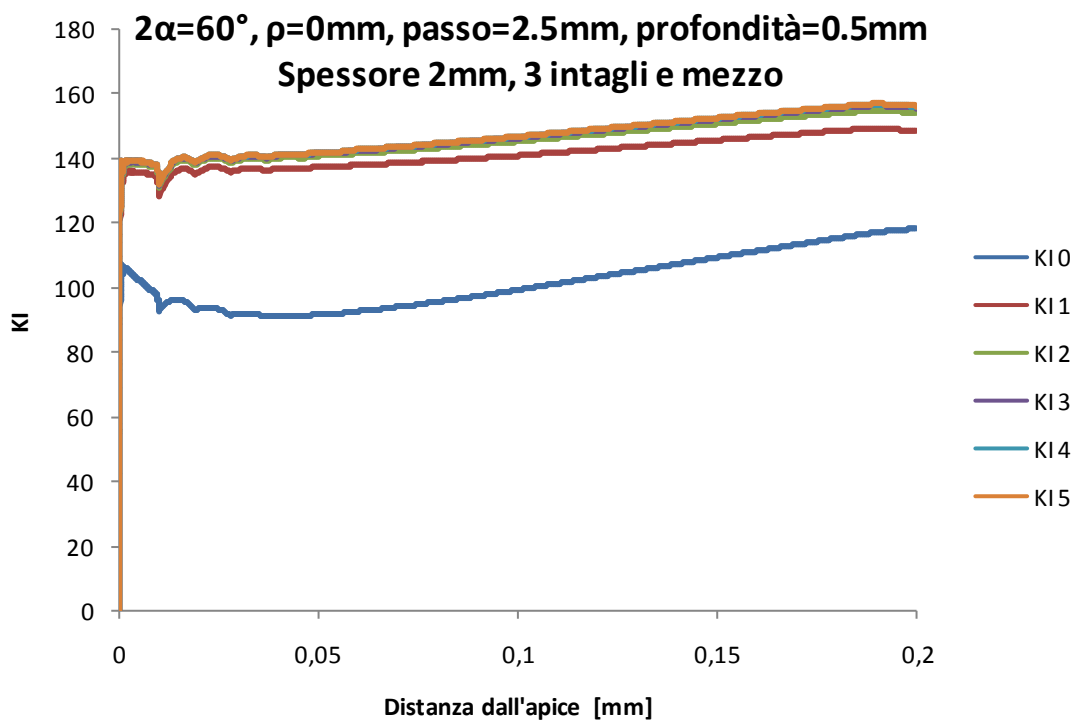
### 7.3 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

#### 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

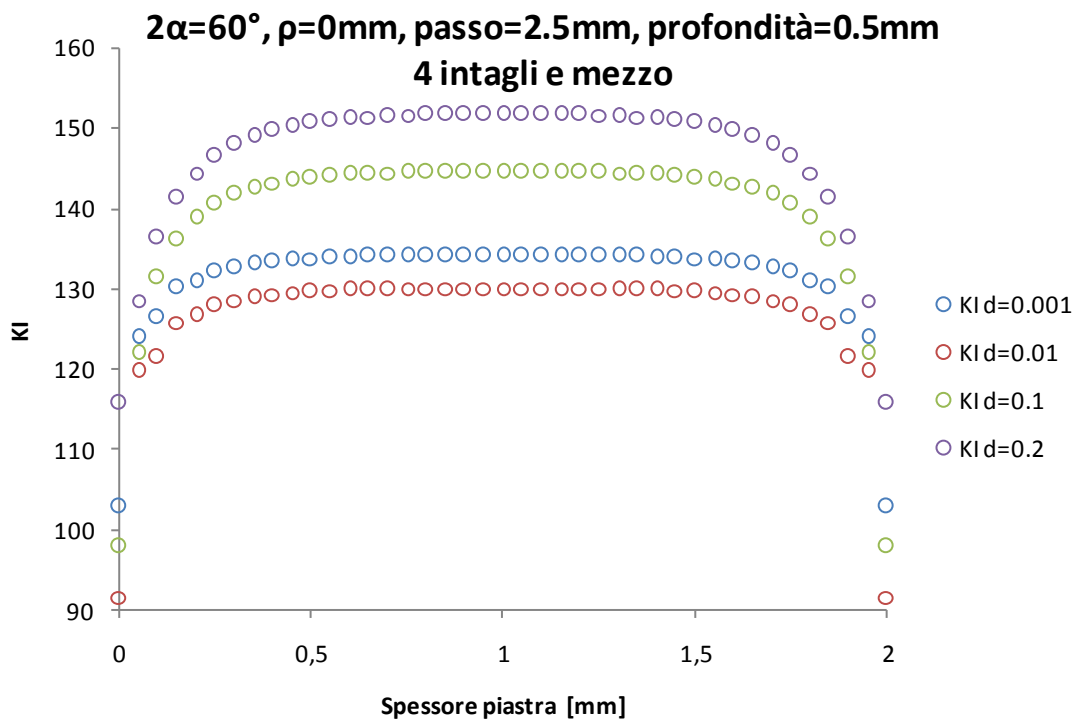


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.

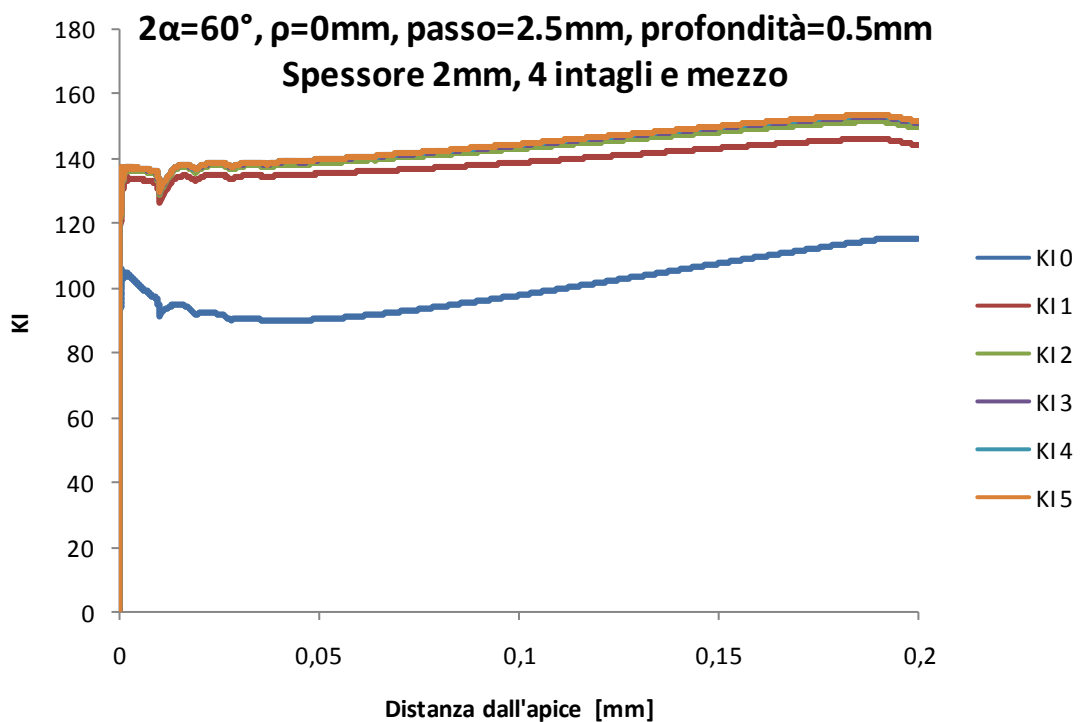


### 7.3.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm, 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



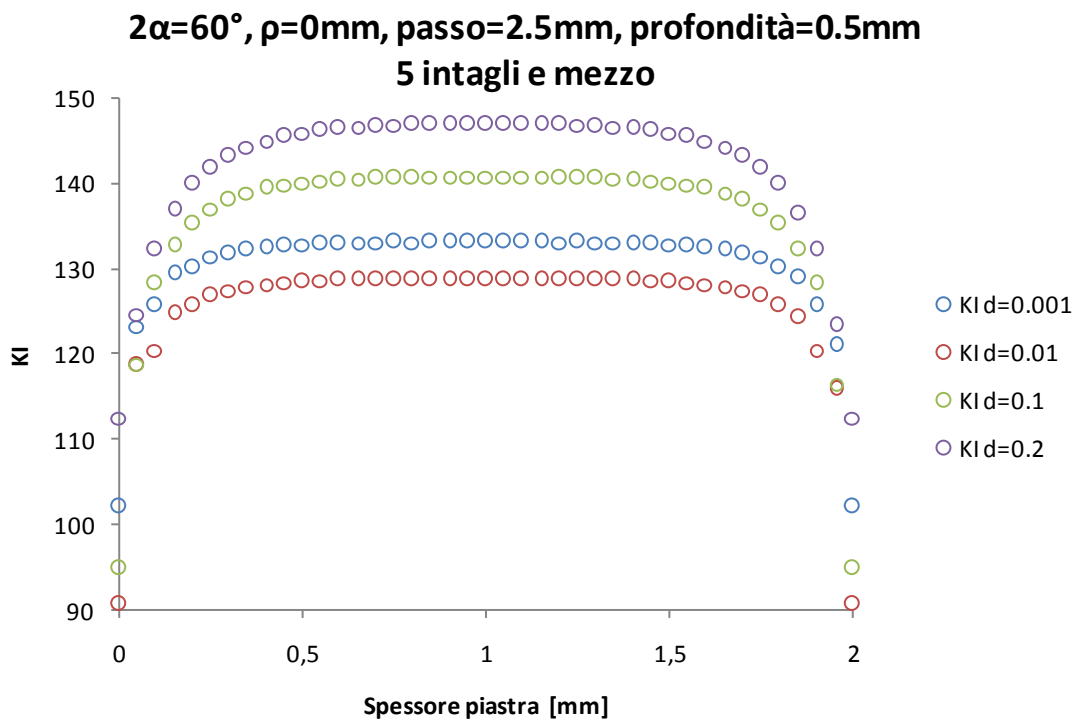
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



### 7.3.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

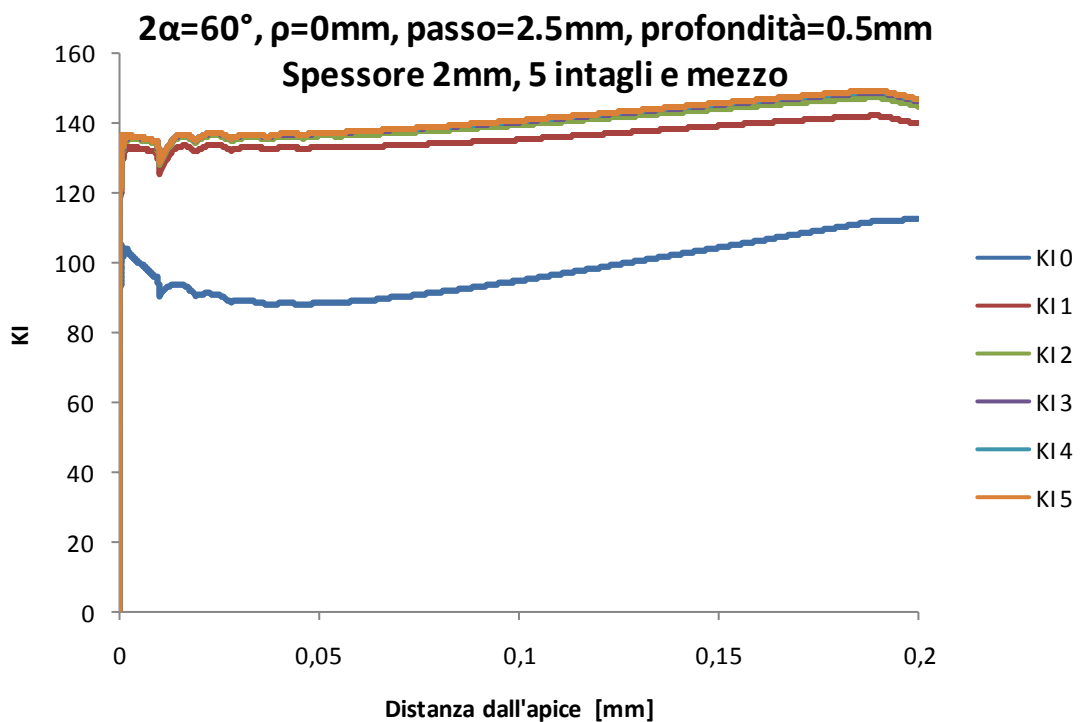
#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



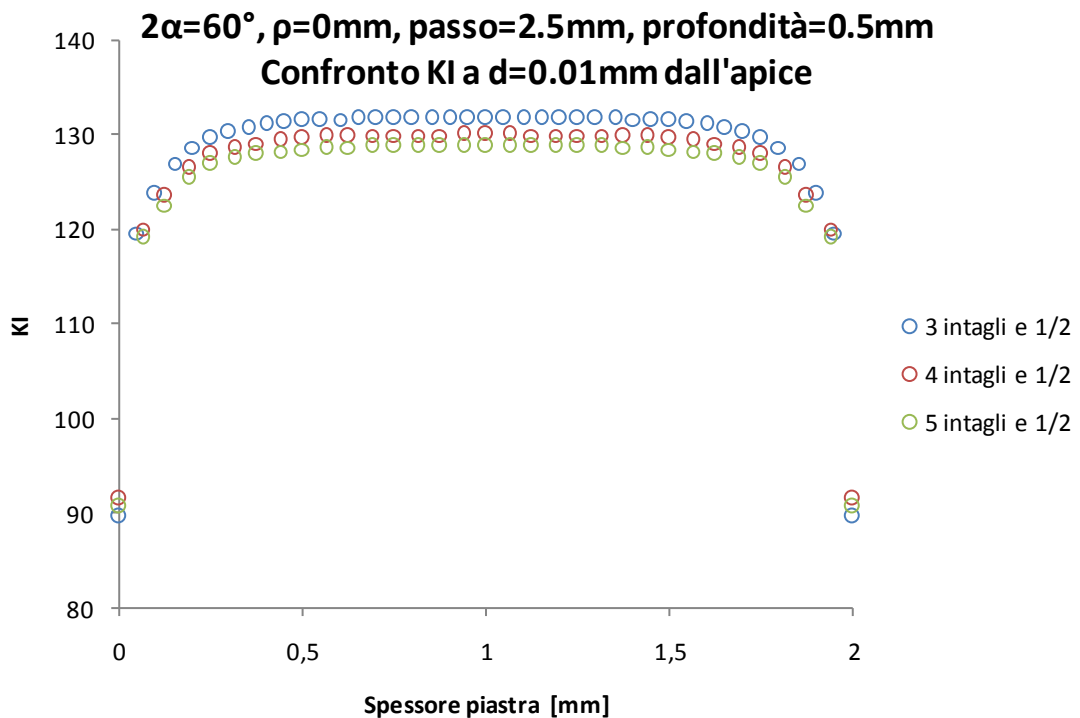


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.

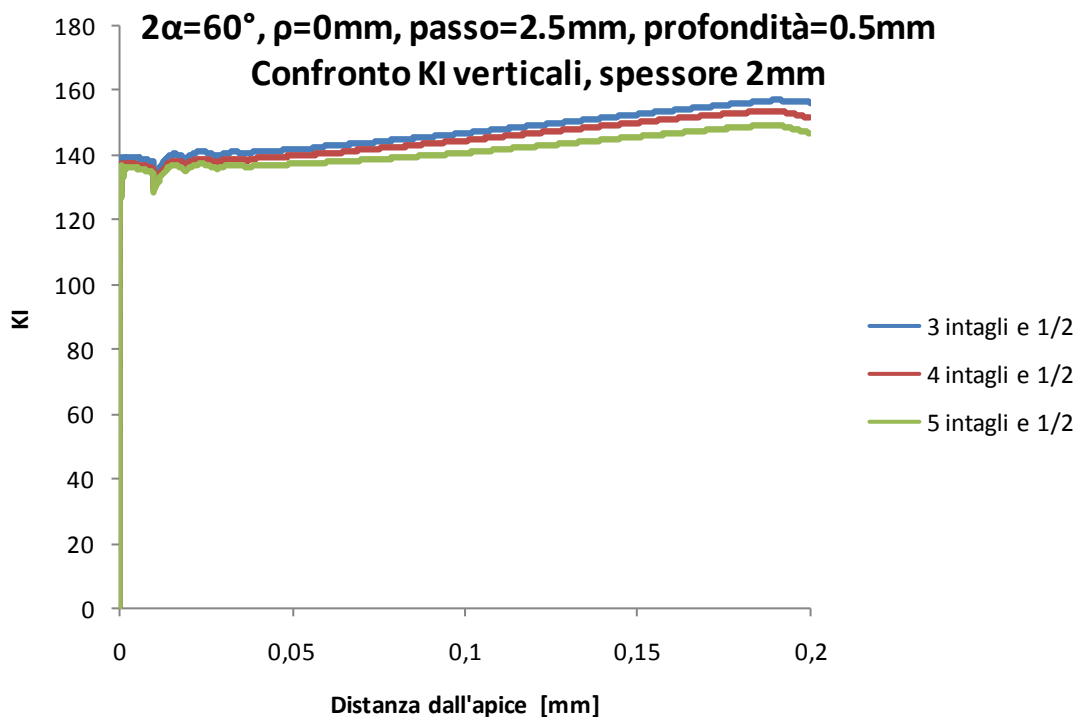


### 7.3.3 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensione calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore delle piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



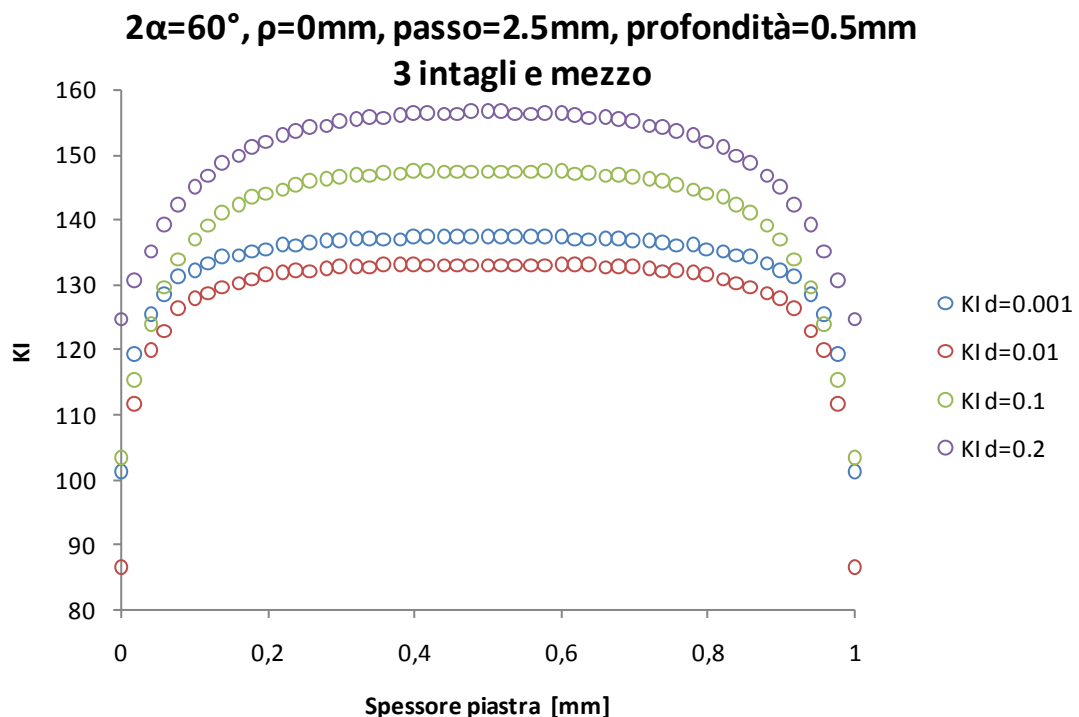
Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$  5. Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



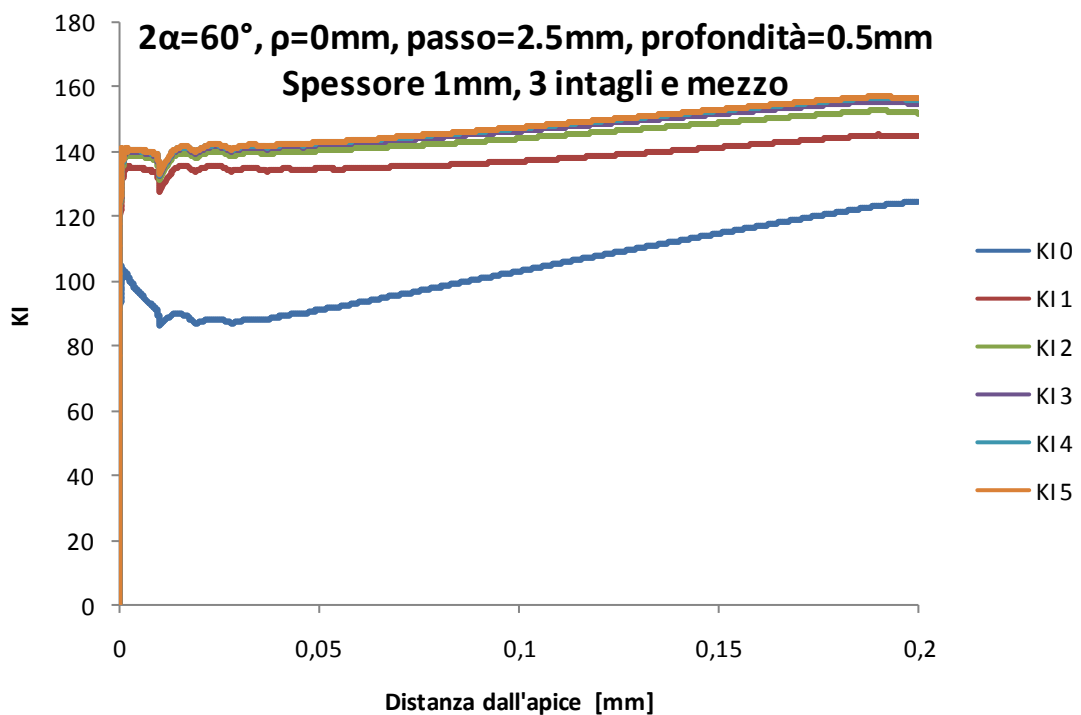
#### 7.4 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

##### 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



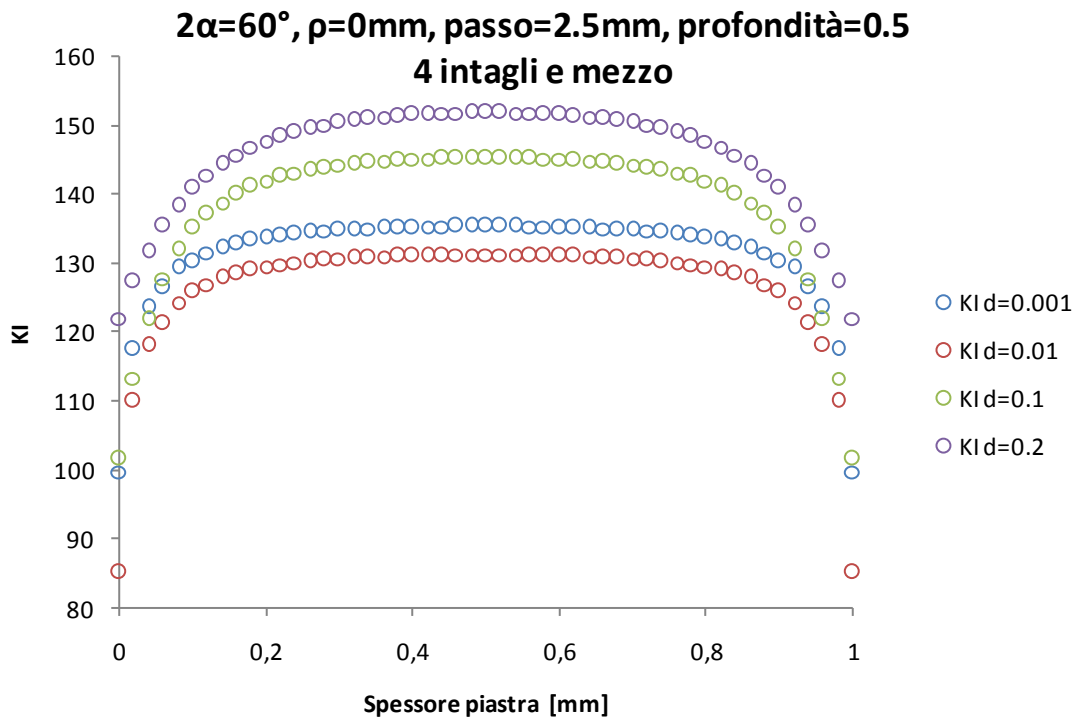
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



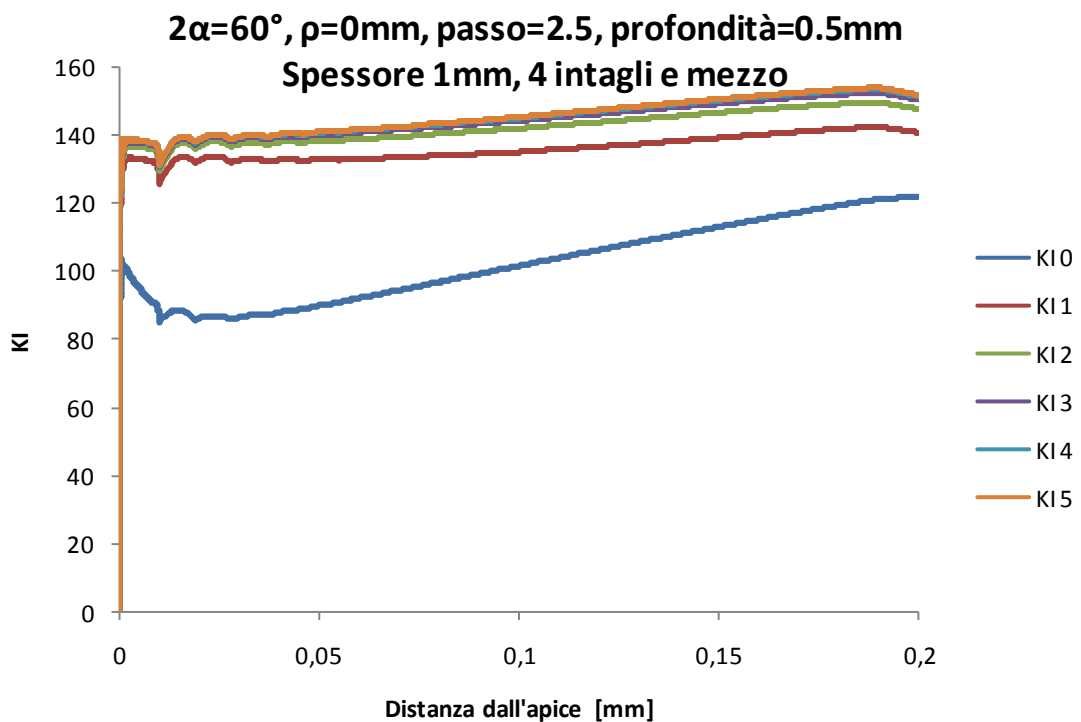
### 7.4.1 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

#### 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

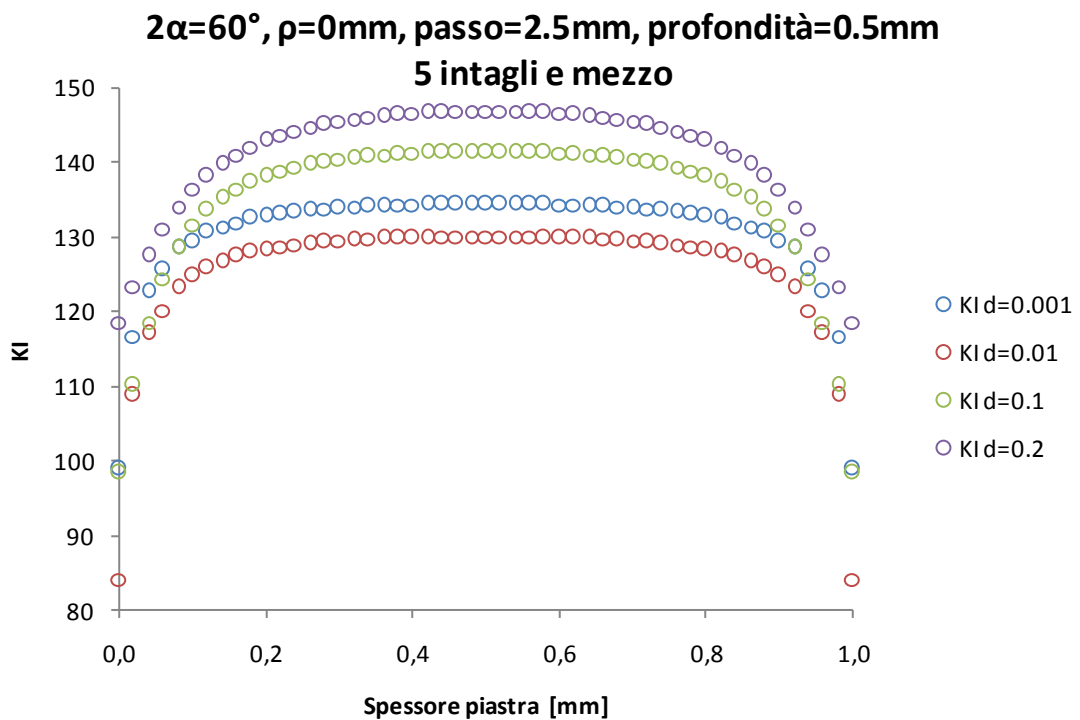


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



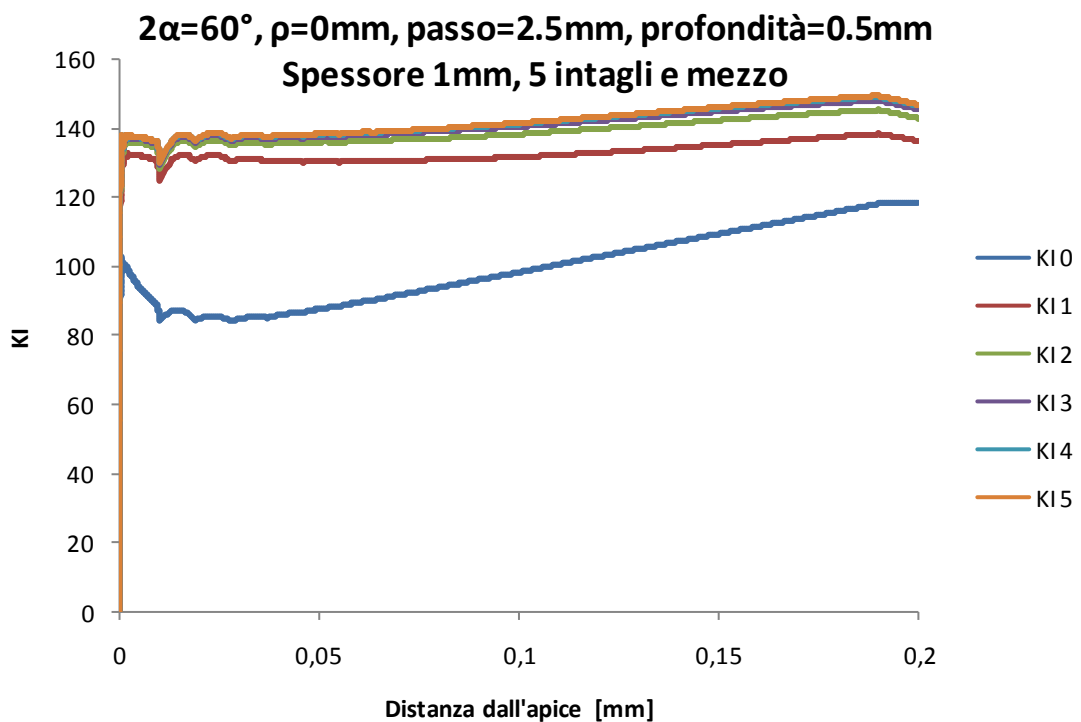
### 7.4.2 $2\alpha=60^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm, 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



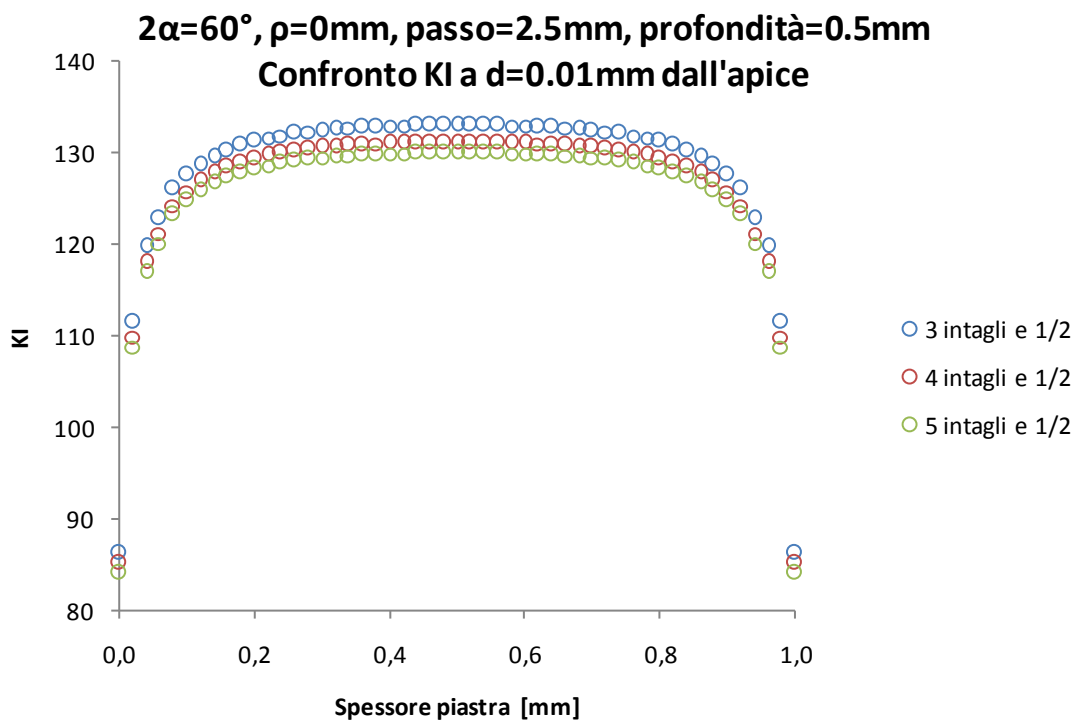


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.

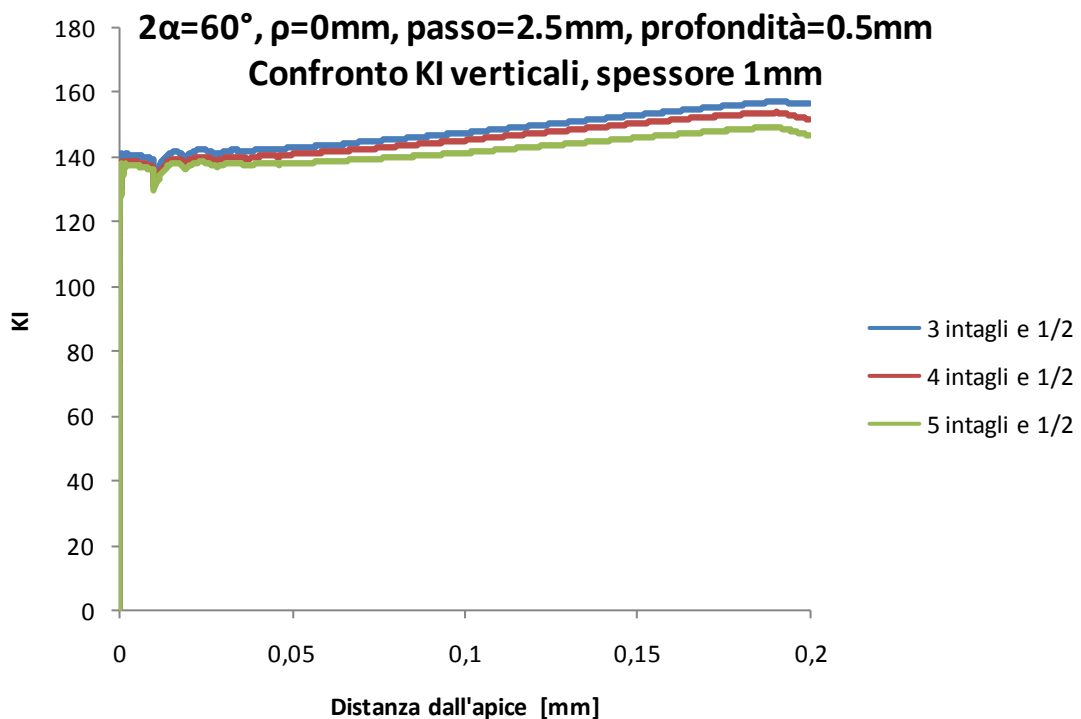


### 7.4.3 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensione calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore delle piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obbiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$  5. Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



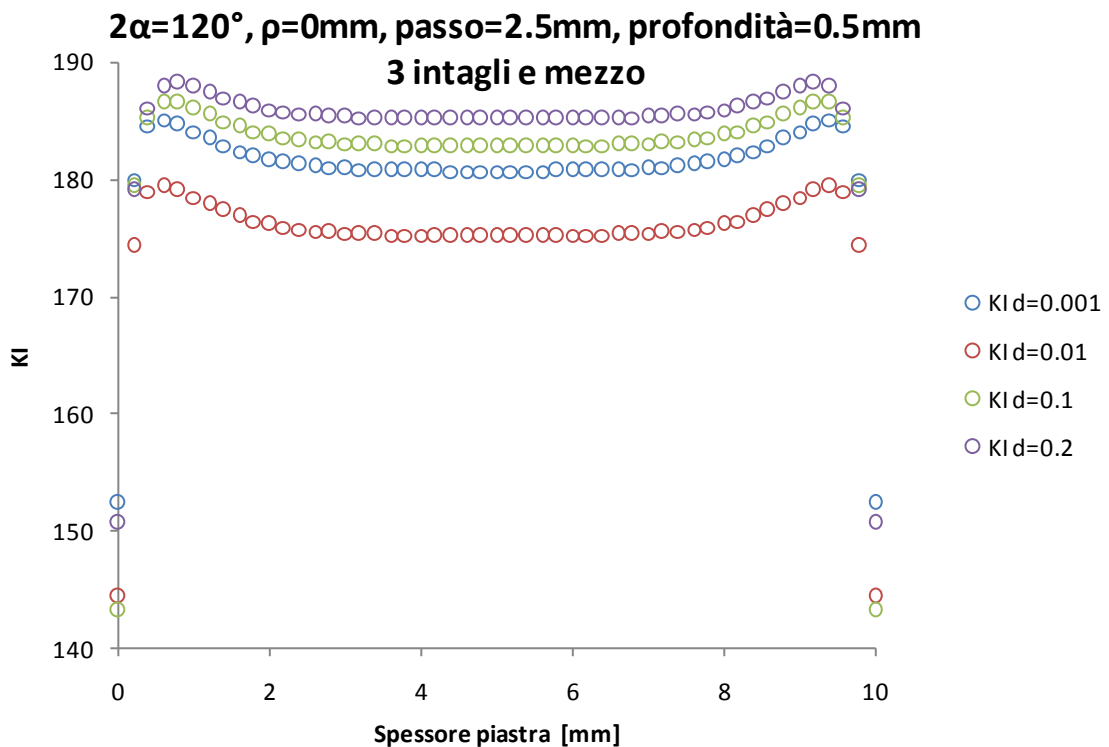


## 8. MODELLO 6: $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$

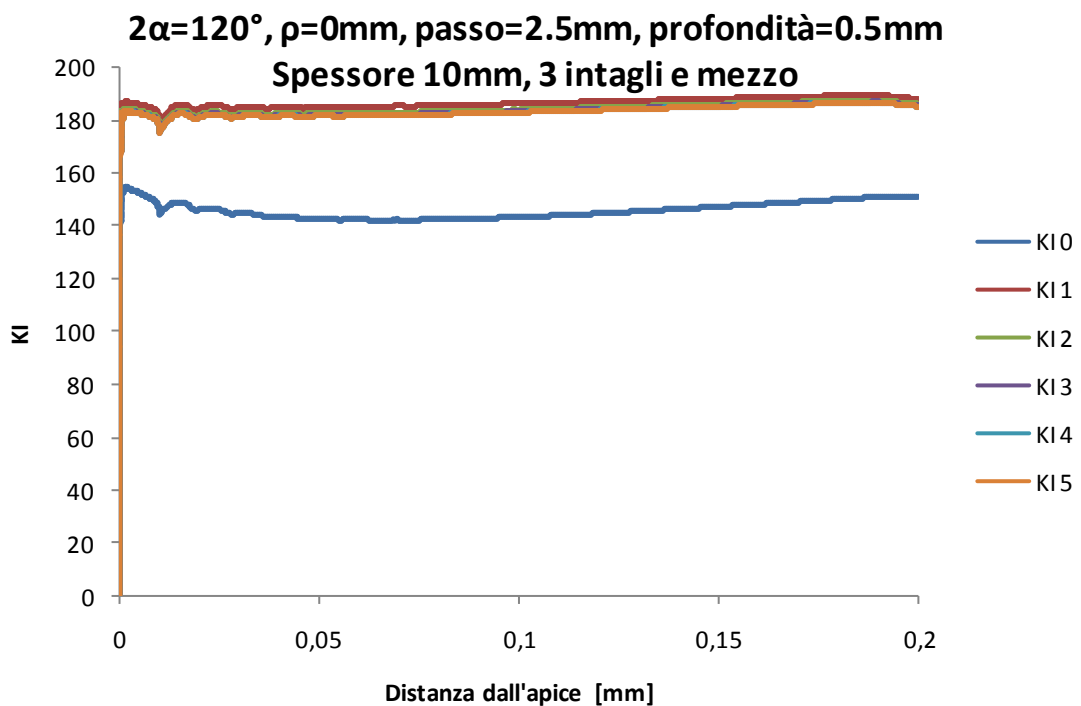
Nella geometria analizzata, le principali dimensioni geometriche della piastra sono le seguenti: angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha=120^\circ$ , raggio all'apice  $\rho=0\text{mm}$ , passo fra gli intagli  $p=2.5\text{mm}$ , profondità dell'intaglio  $t=0.5\text{mm}$ . Per semplificare il modello si è sfruttato il concetto di simmetria, modellando così solamente  $\frac{1}{4}$  di piastra, considerando inizialmente tre intagli e mezzo. Come precedentemente spiegato, si procede plottando la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio, precisamente a 0.001, 0.01, 0.1 e 0.2mm. Successivamente, per ogni distanza, si sono calcolati i rispettivi valori del fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$  prendendo  $\lambda_1$  pari a 0.6157 in quanto è l'autovalore associato ad un angolo di apertura dell'intaglio  $2\alpha$  pari a  $120^\circ$ . Il passo successivo è quello di andare plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio partendo: in questo caso, nella formula per il calcolo del fattore di intensificazione delle tensioni  $K_I$ , la distanza  $S$  non è più costante, ma è variabile e precisamente parte da zero quando si è all'apice dell'intaglio, via via aumentando più ci si allontana.

### 8.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm, 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



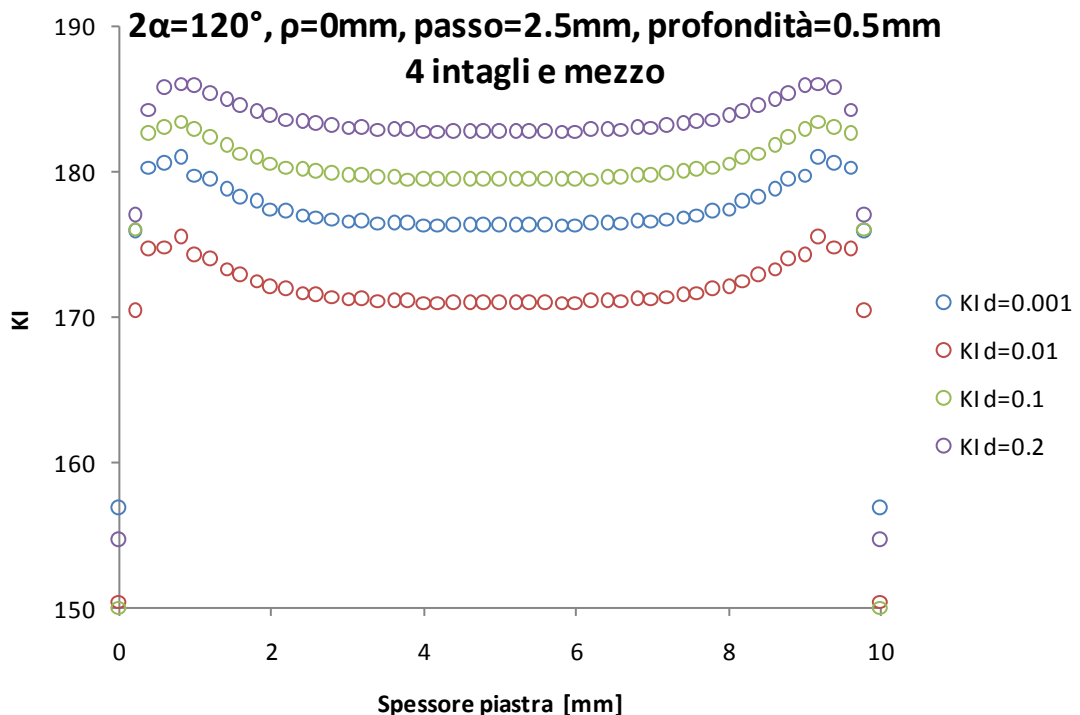
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



### 8.1.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm,

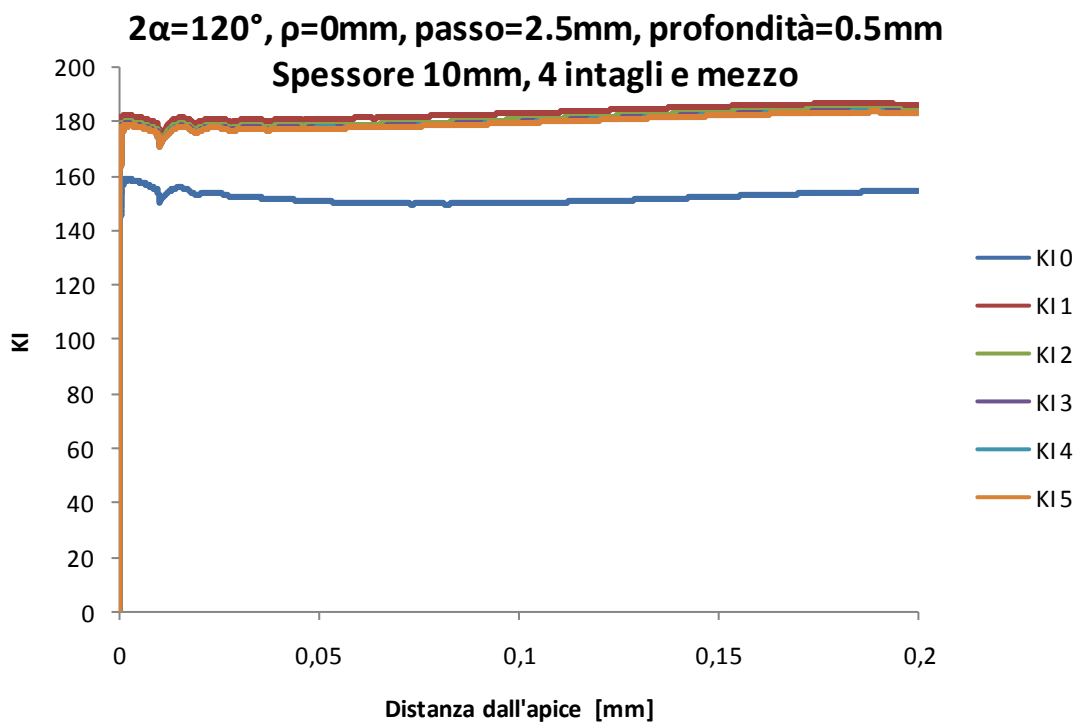
#### 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.





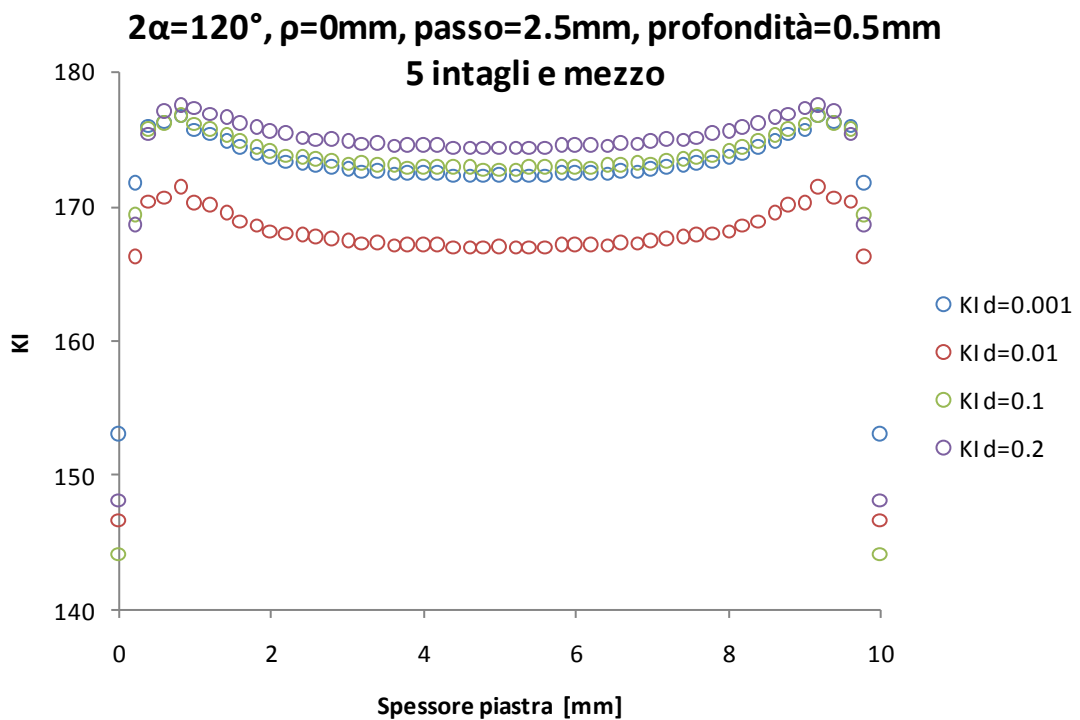
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



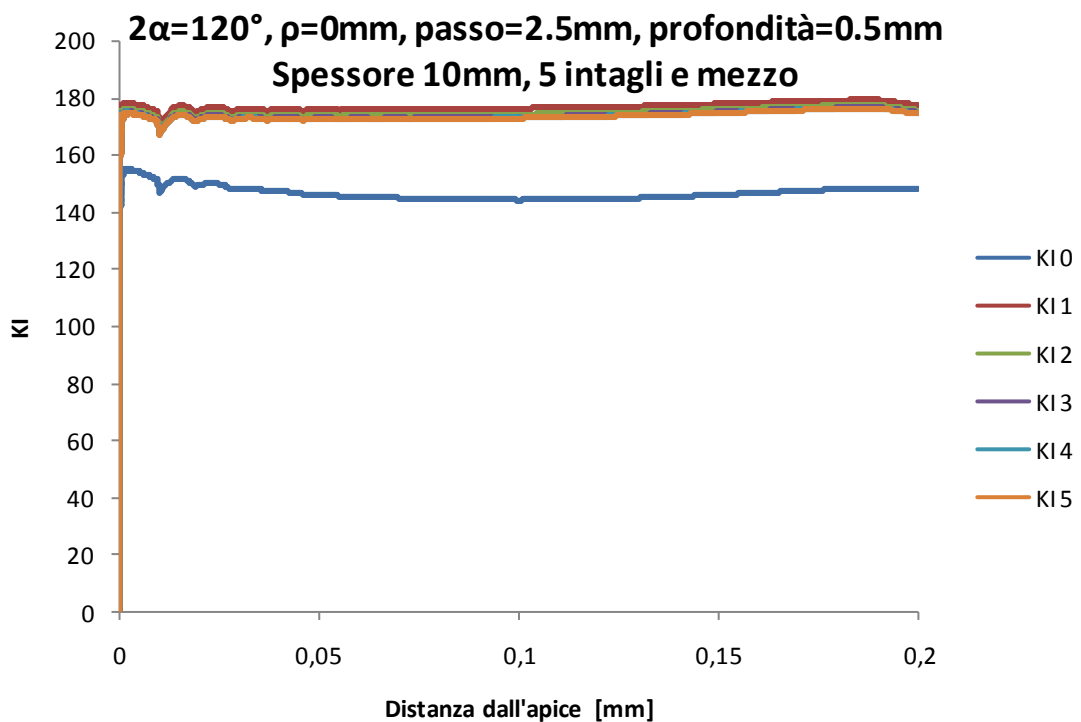
### 8.1.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm,

#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



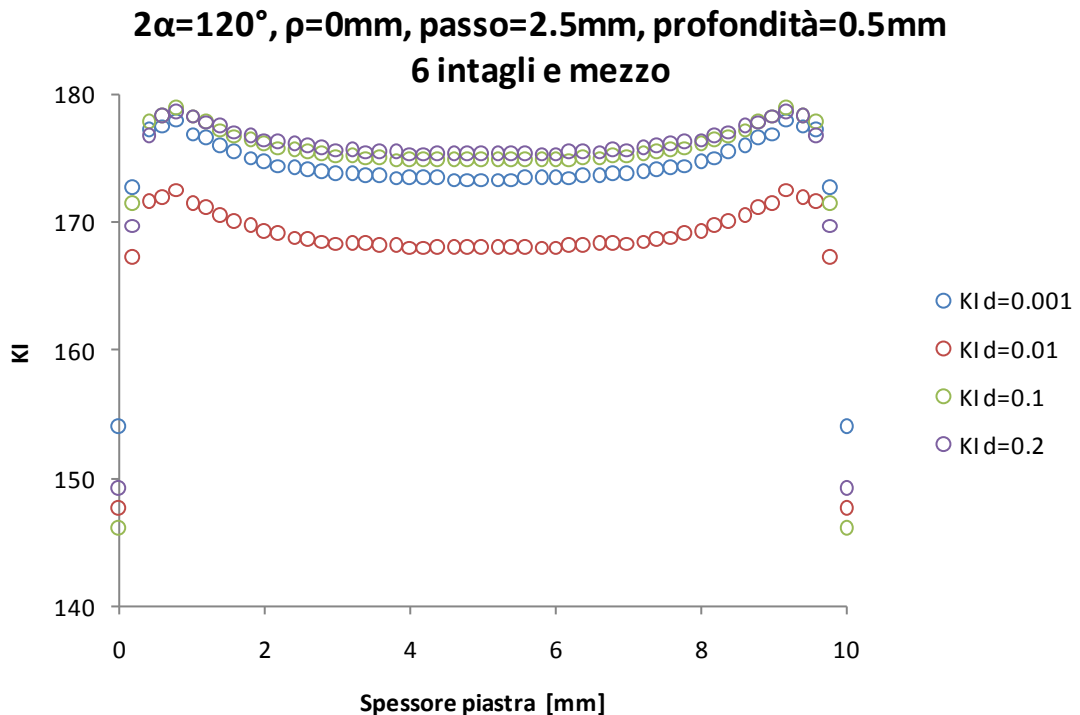
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



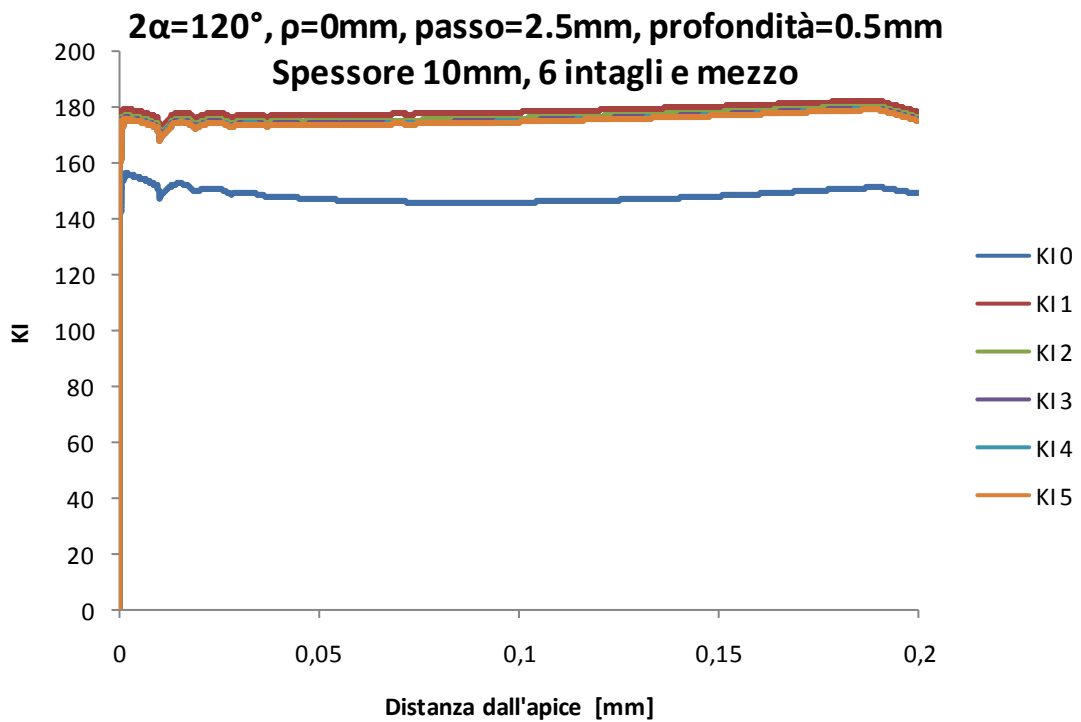
### 8.1.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 10mm,

#### 6 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

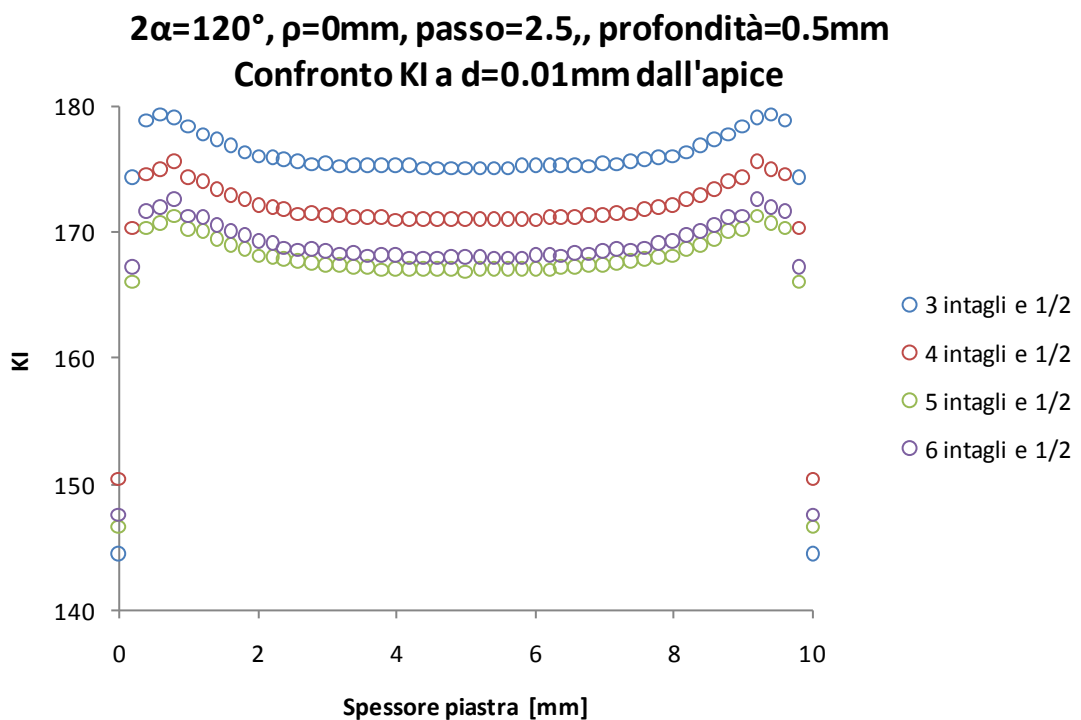


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.

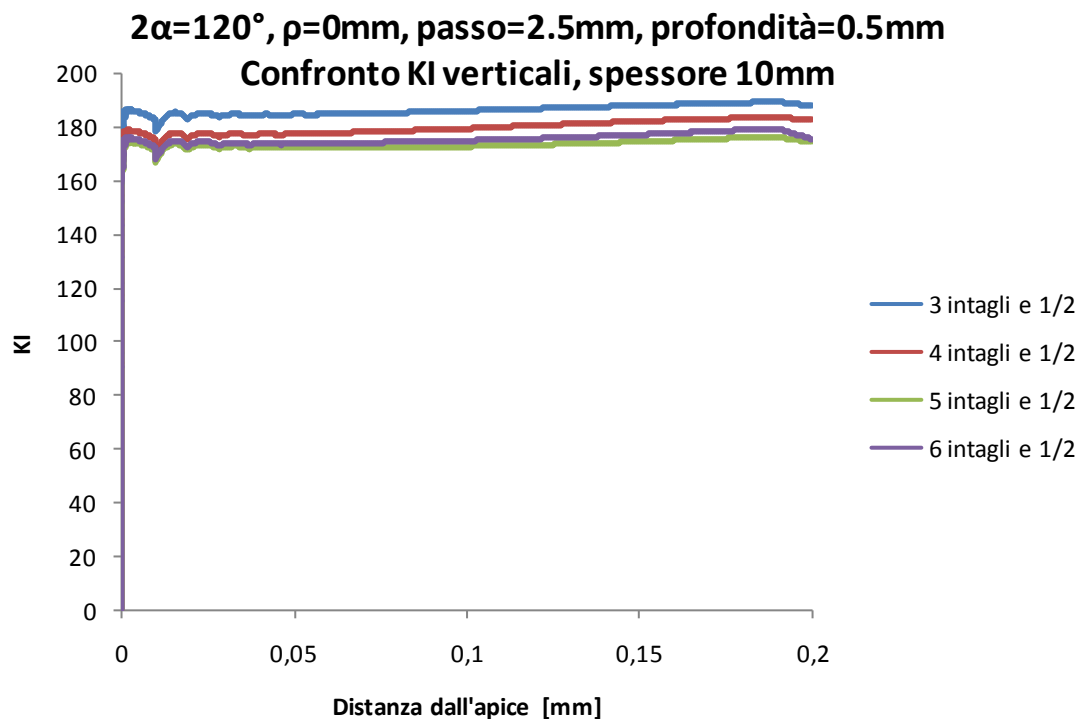


### 8.1.4 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensione calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore delle piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obbiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



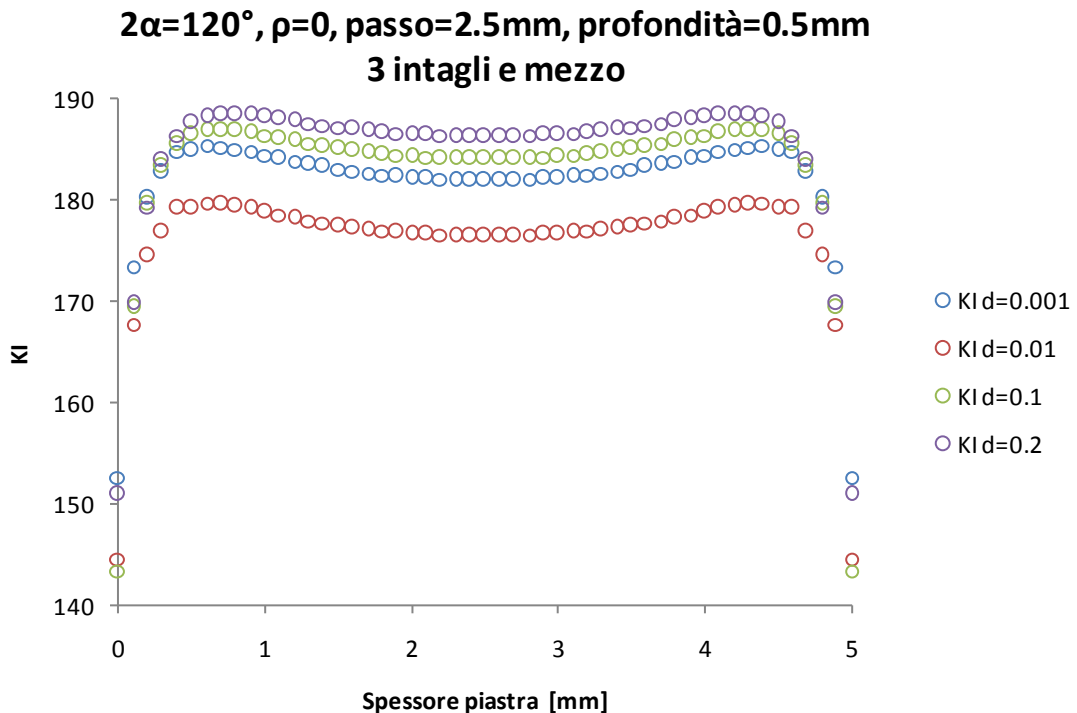
Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$ . Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



## 8.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm,

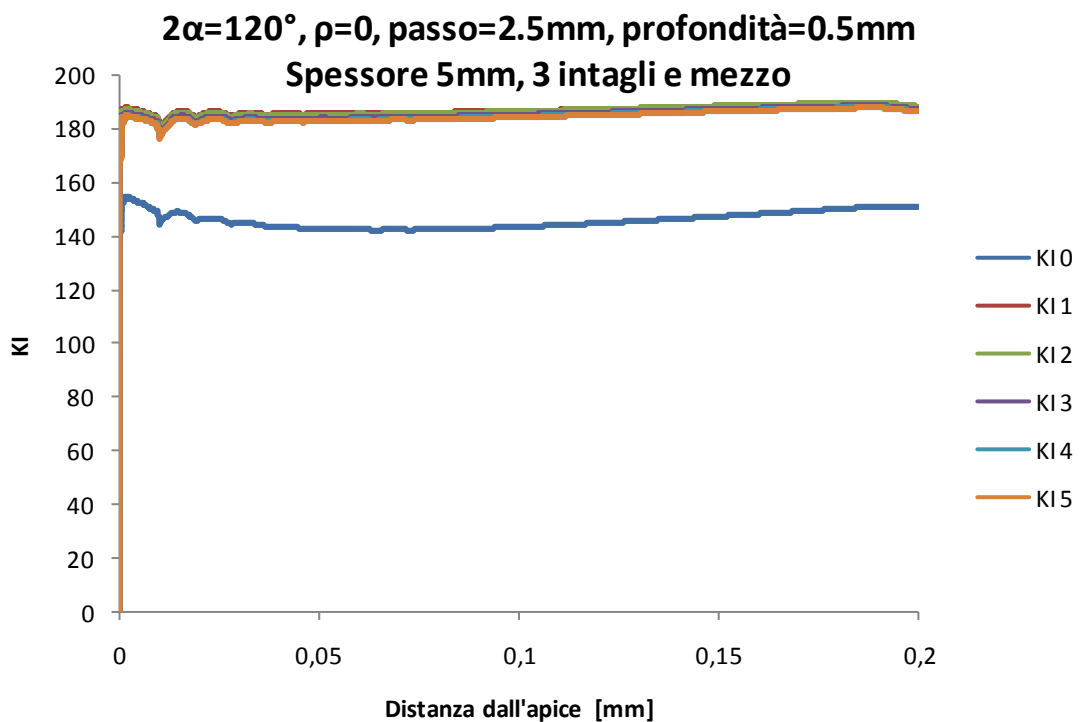
### 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.





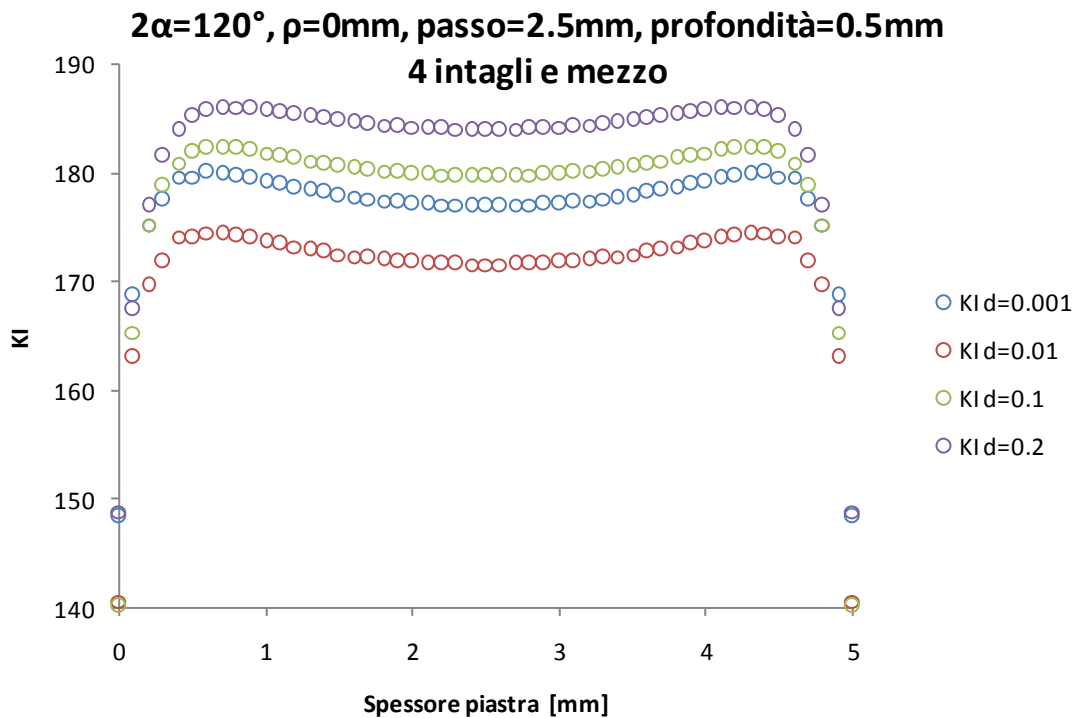
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



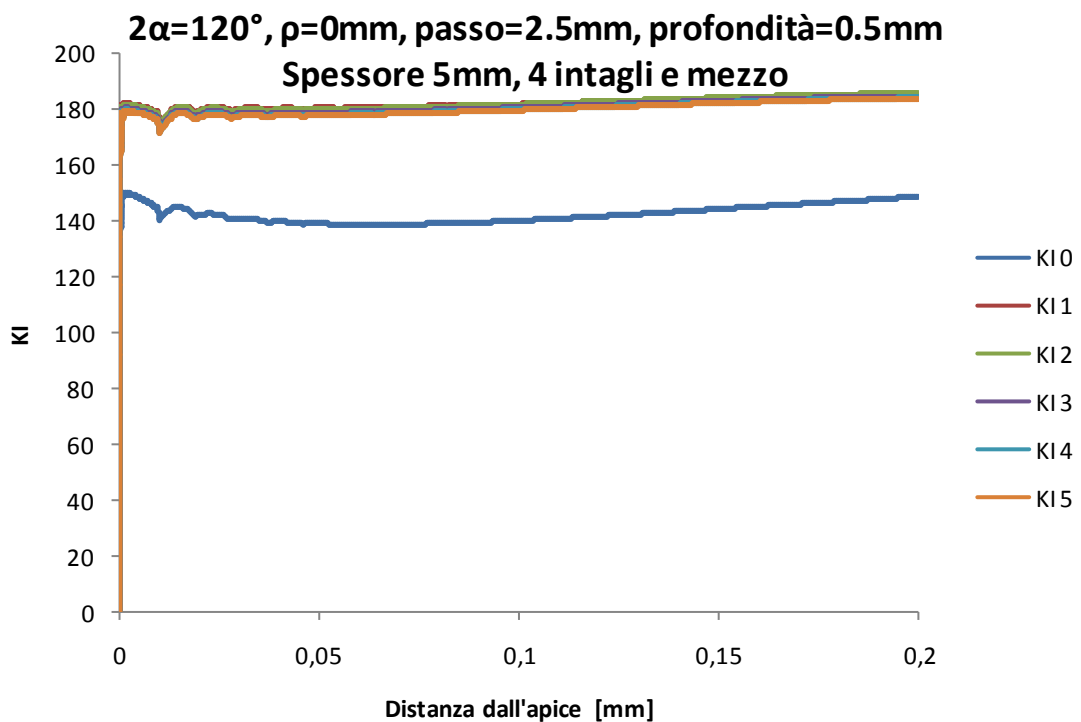
### 8.2.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm,

#### 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



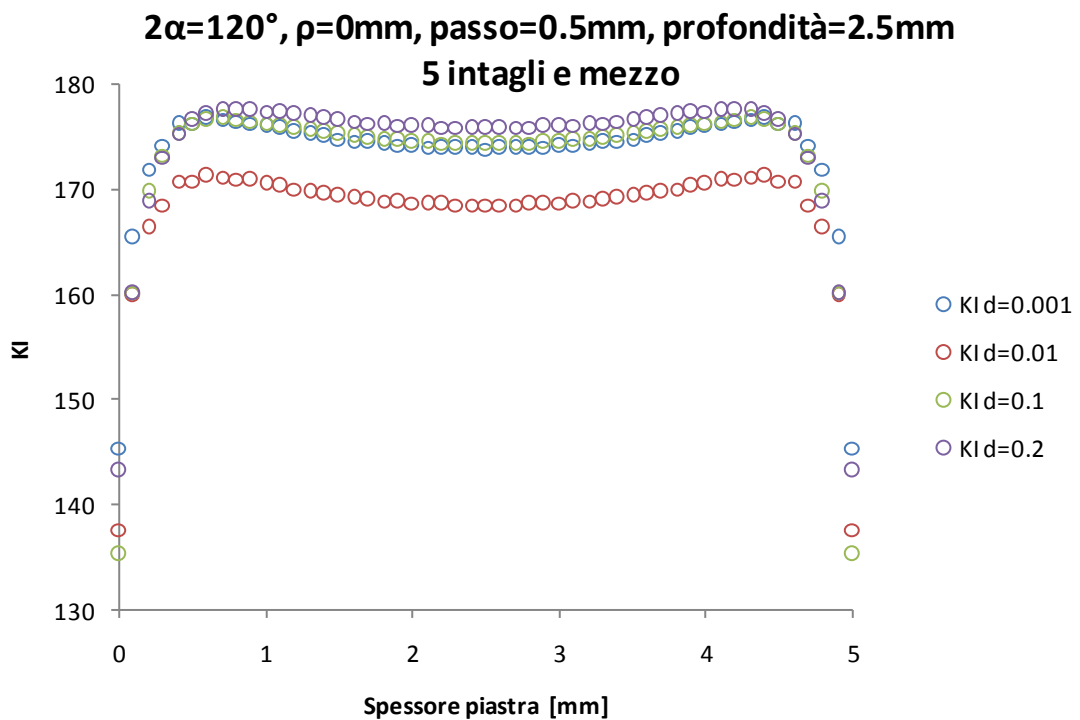
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



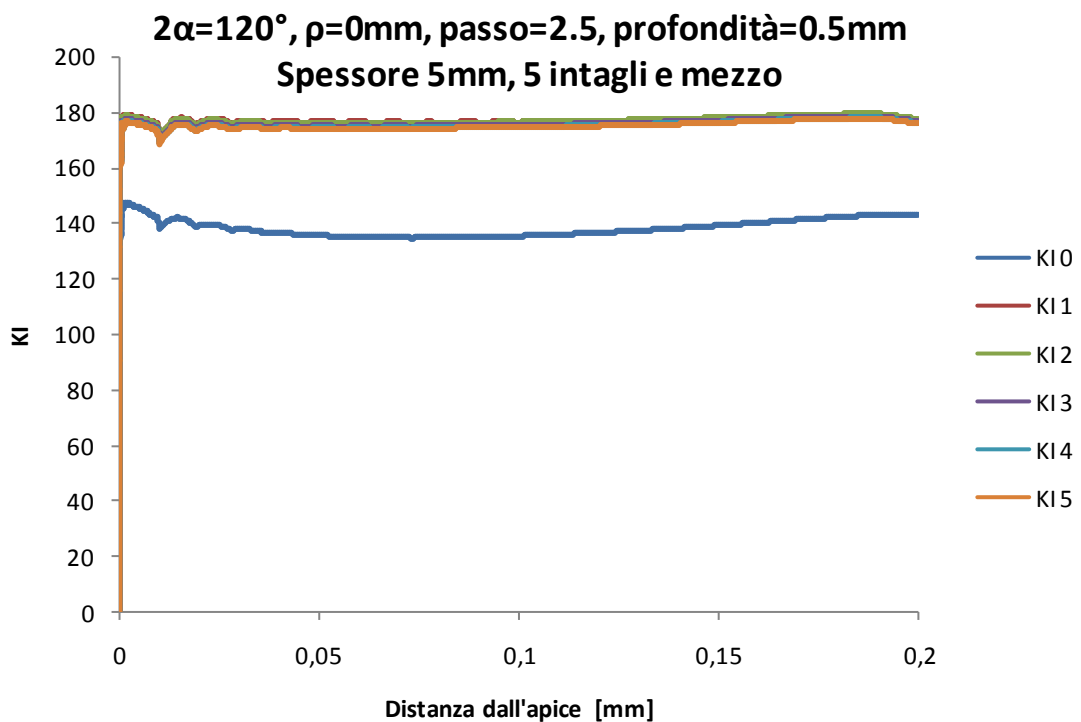
### 8.2.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm,

#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



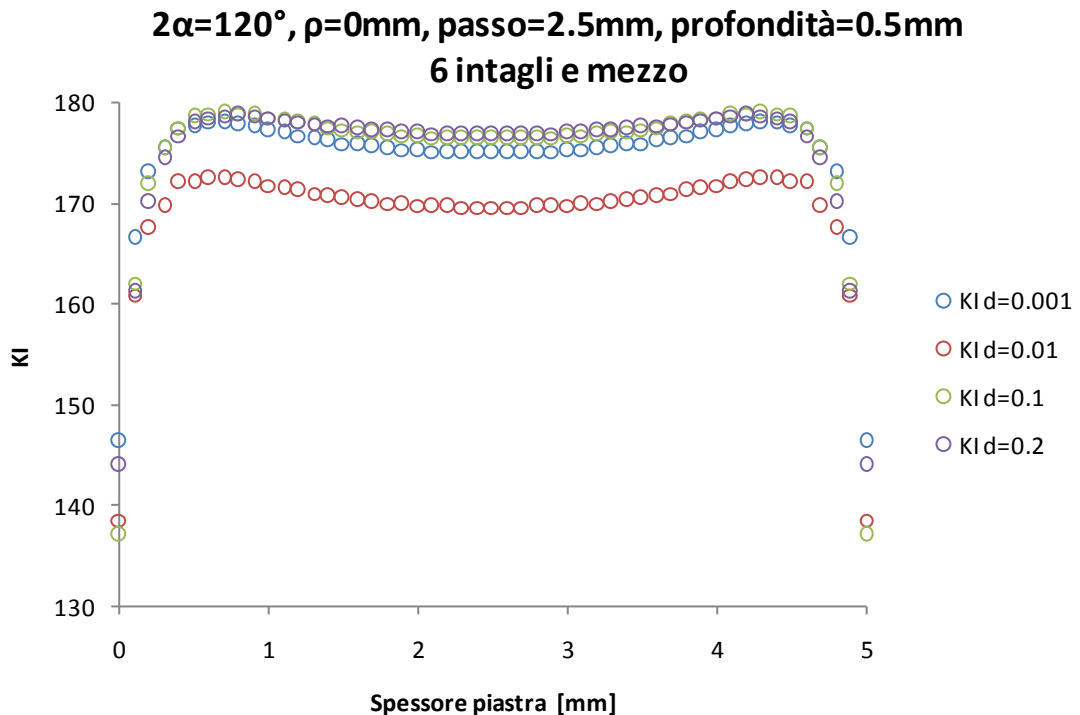
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



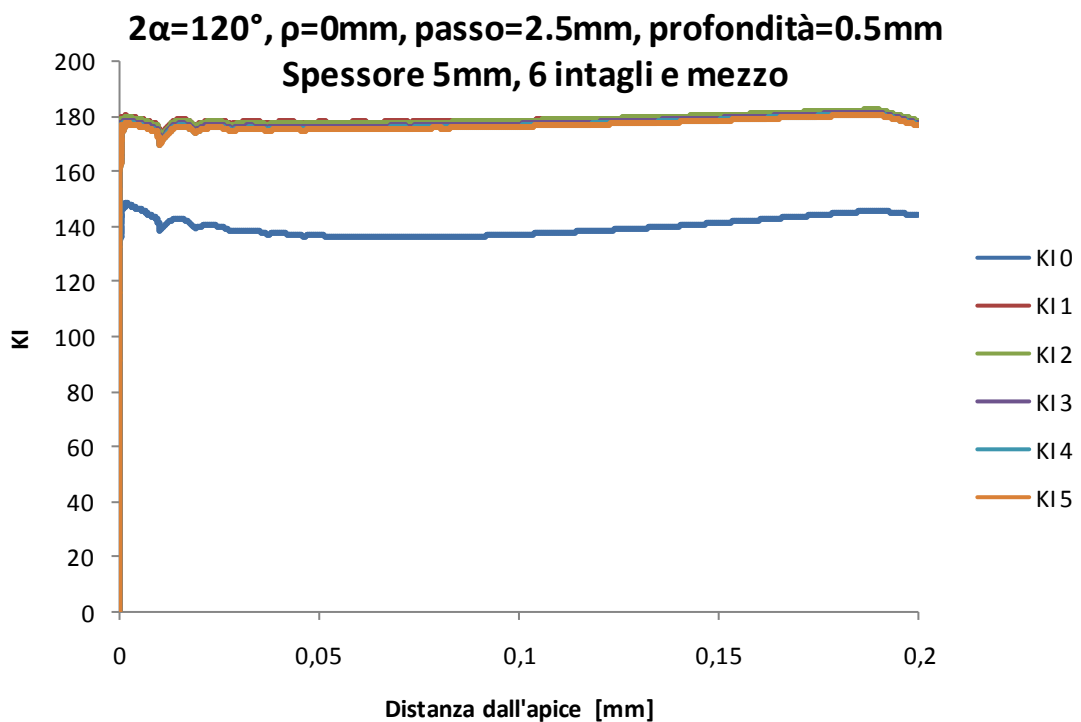
### 8.2.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 5mm,

#### 6 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

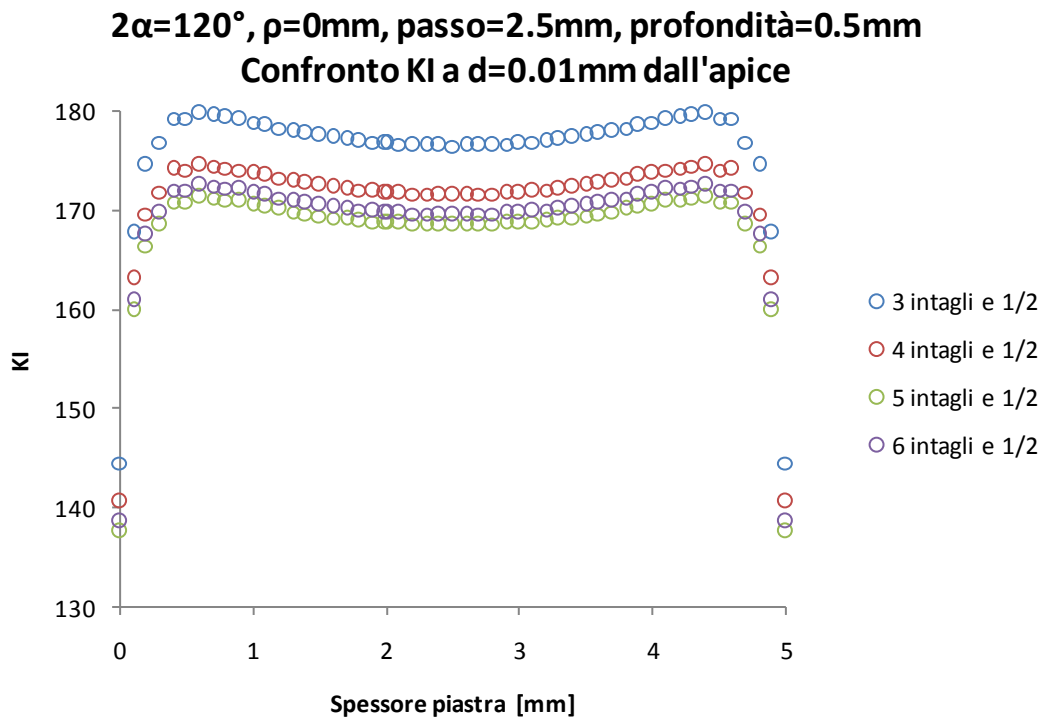


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta due picchi massimi in prossimità del bordo, con un calo in mezzeria dello spessore.



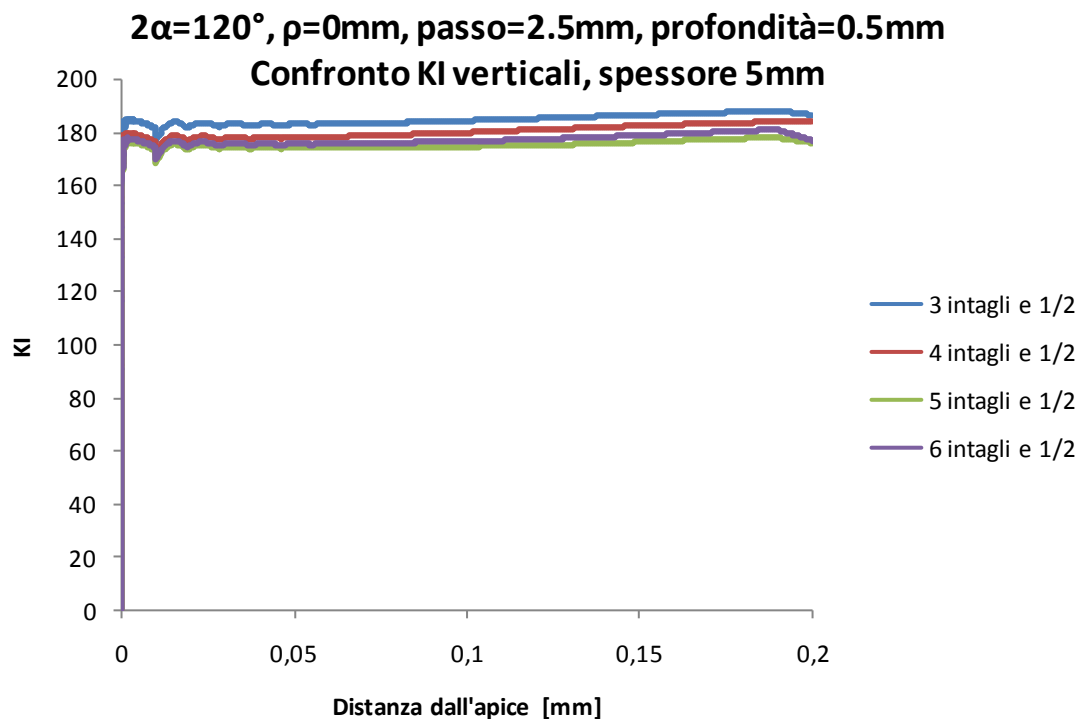
### 8.2.4 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensione calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore delle piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obbiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.





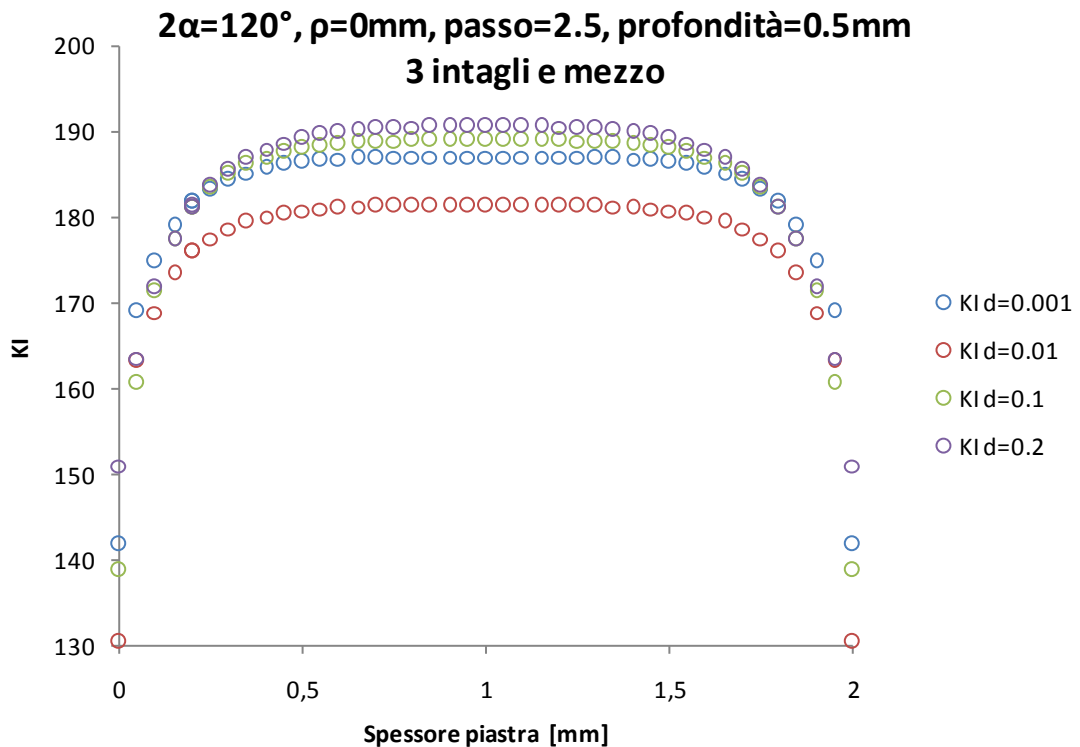
Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$ . Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



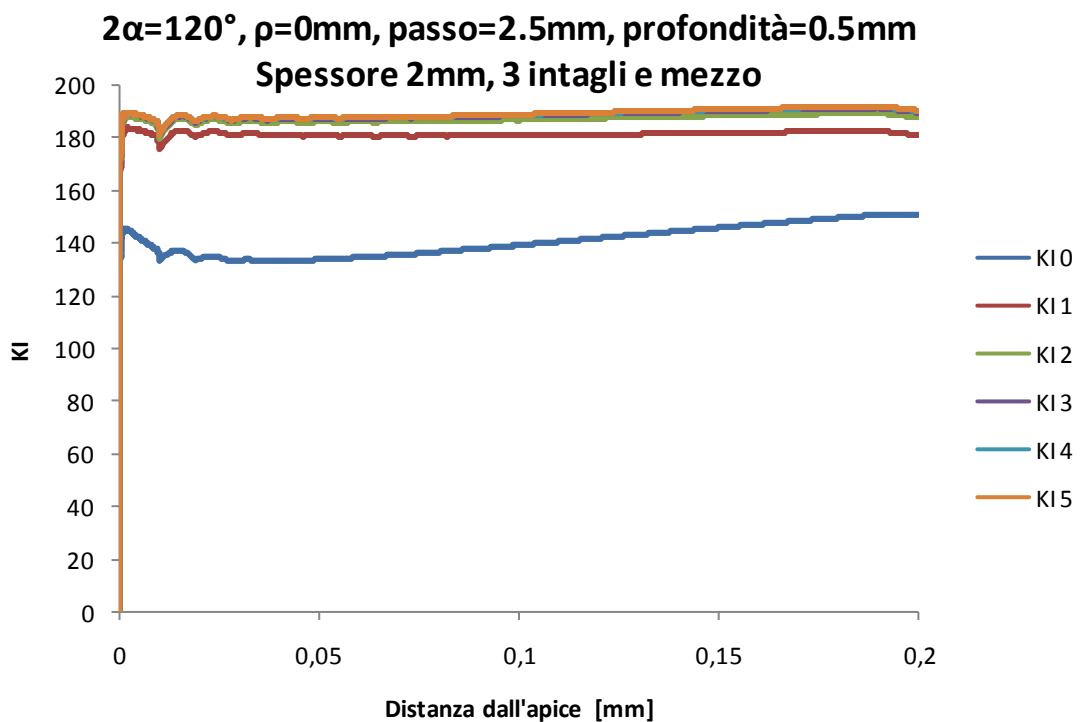
### 8.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

#### 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



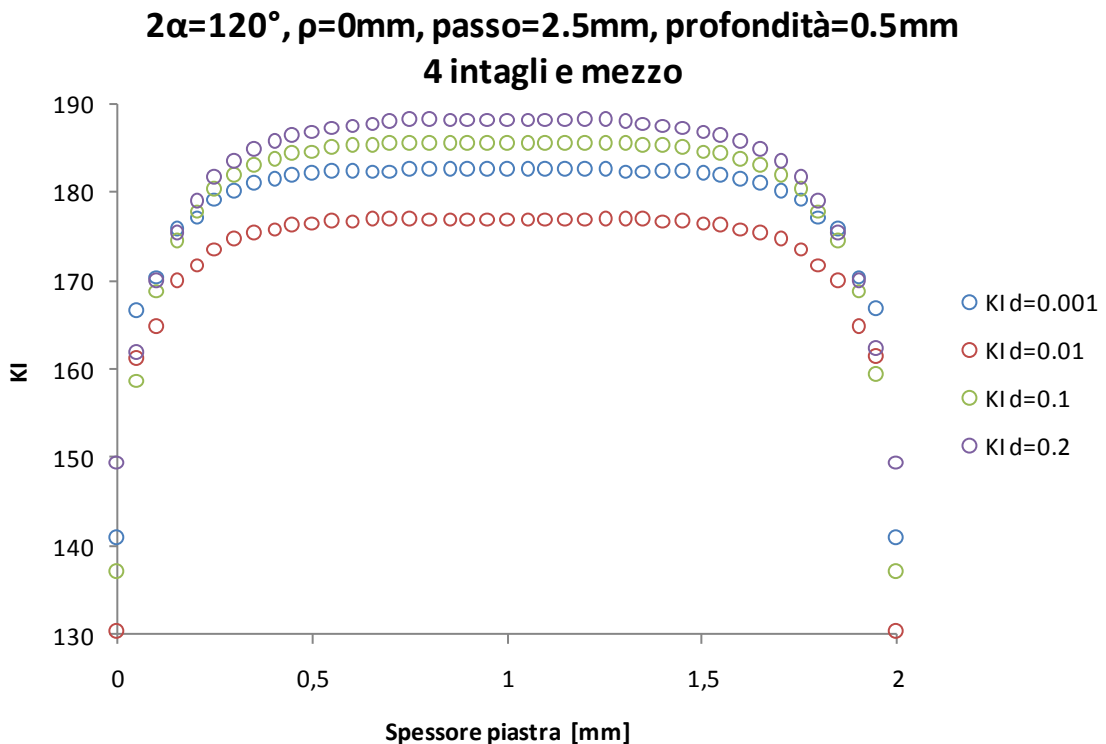
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



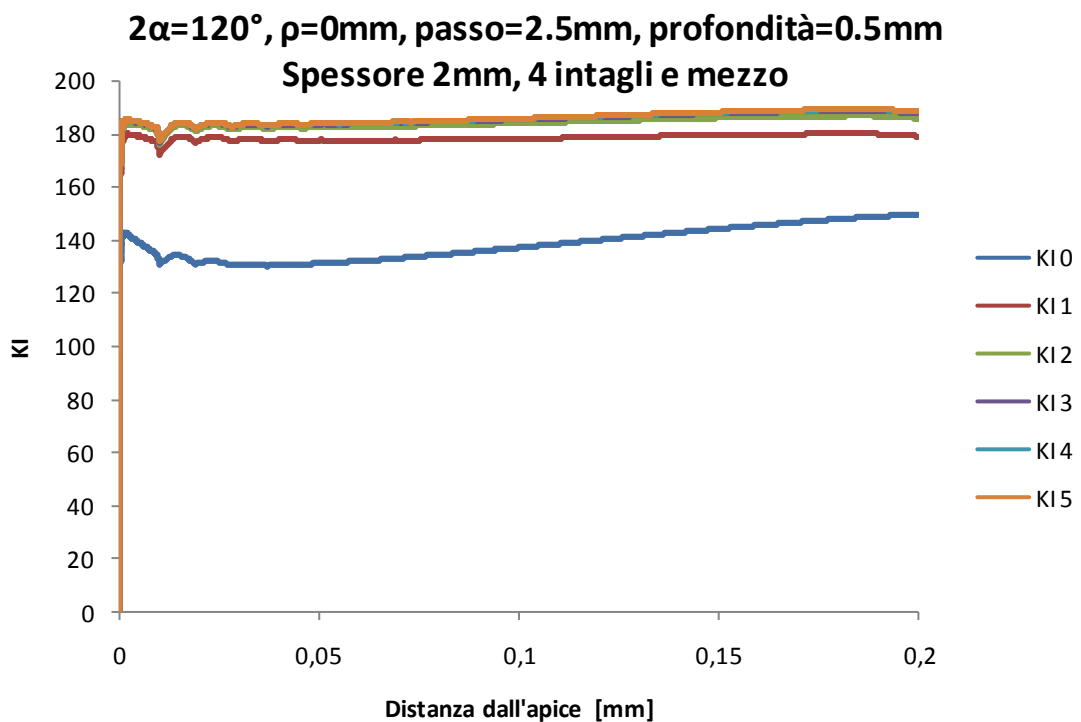
### 8.3.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

#### 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



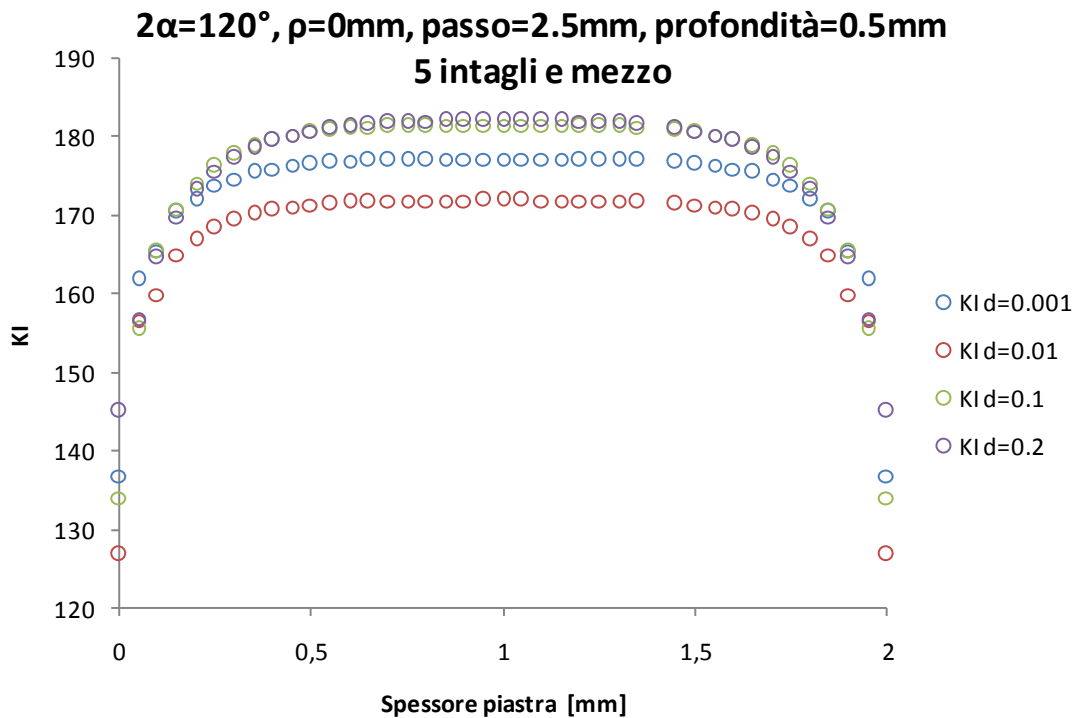
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



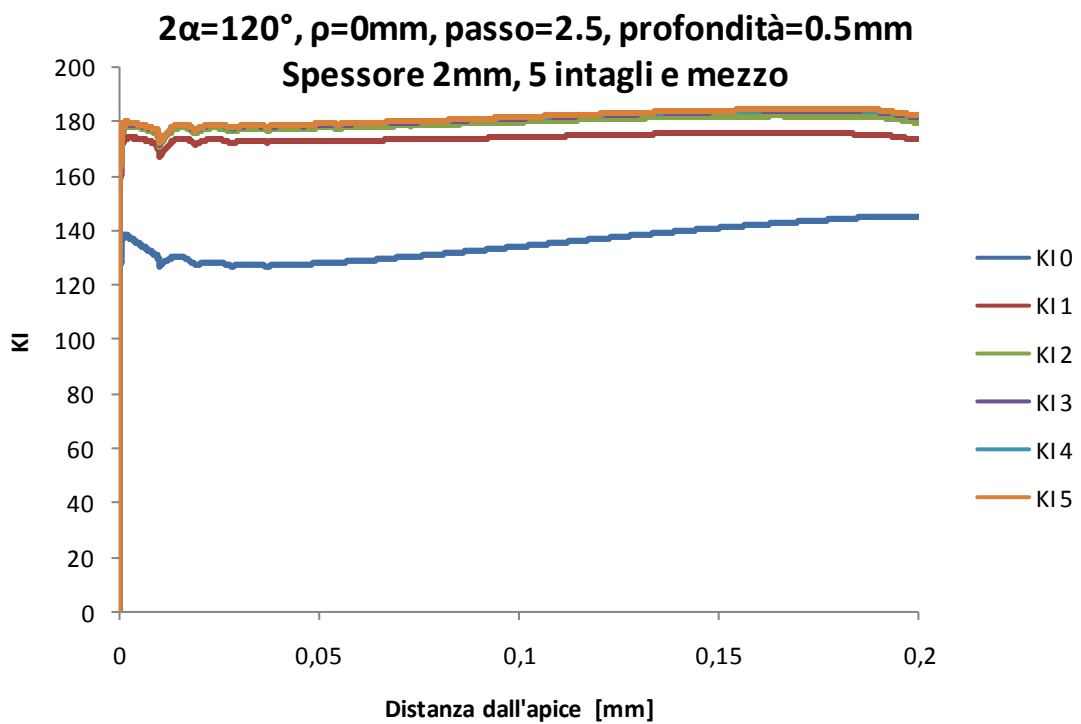
### 8.3.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



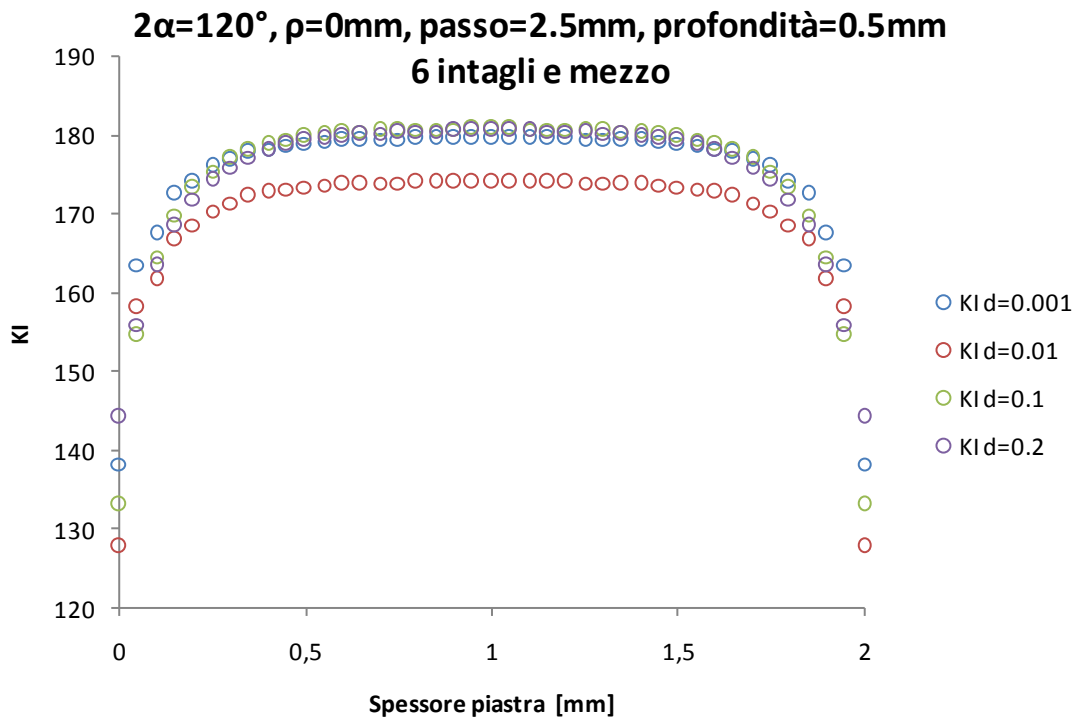
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



### 8.3.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 2mm,

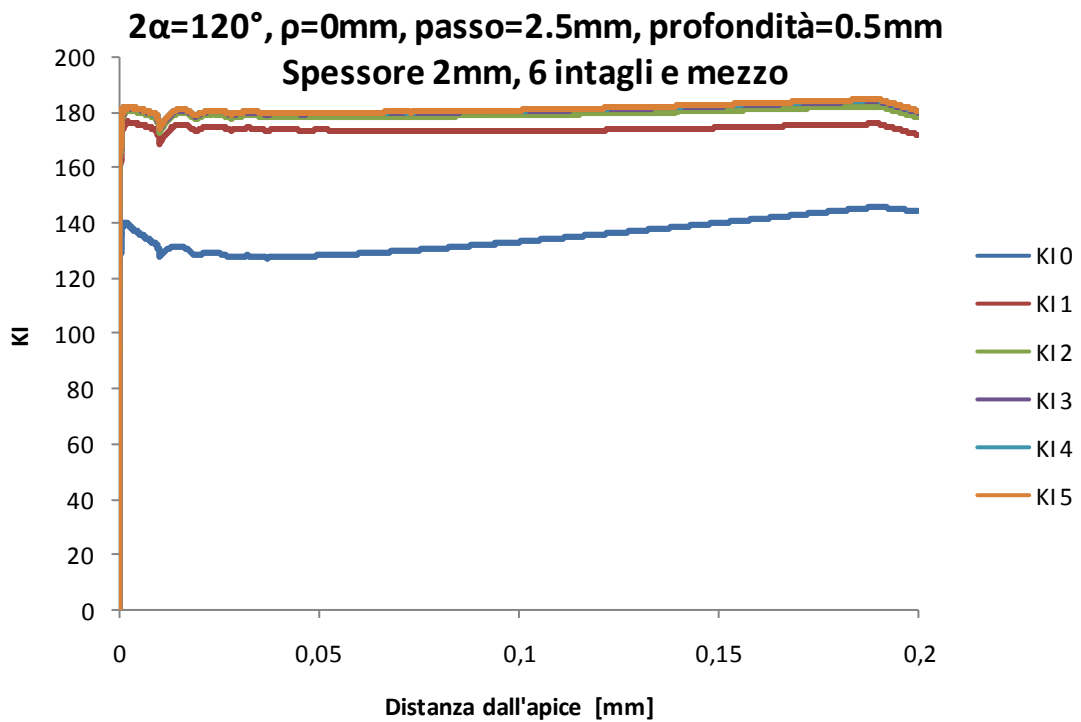
#### 6 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



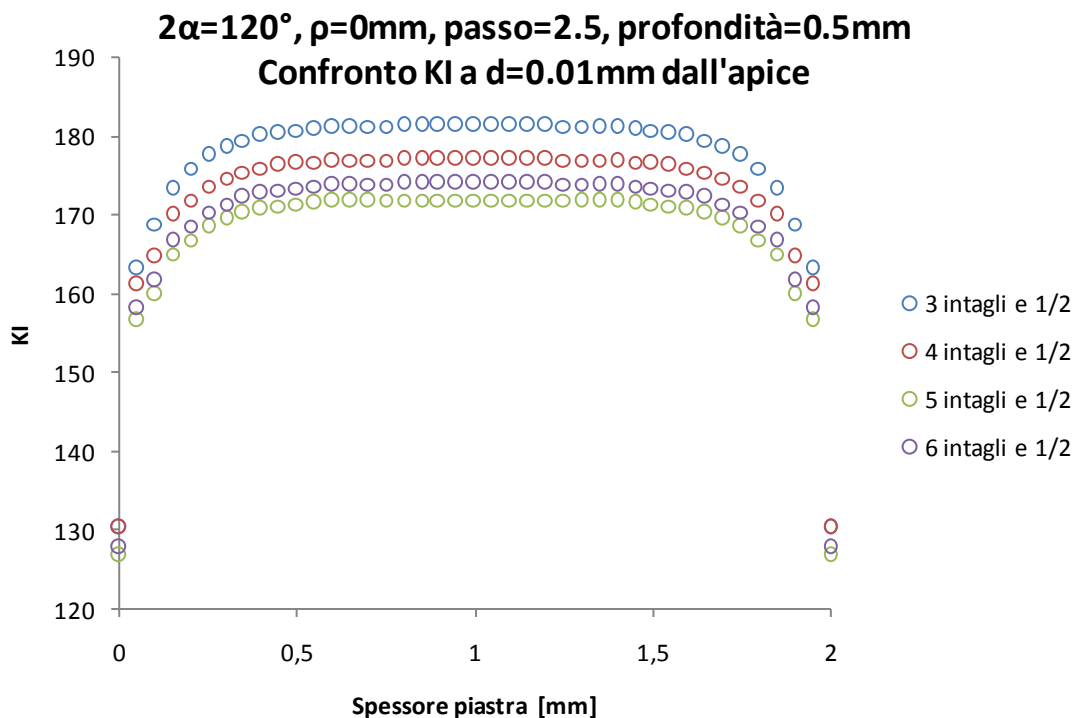


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.

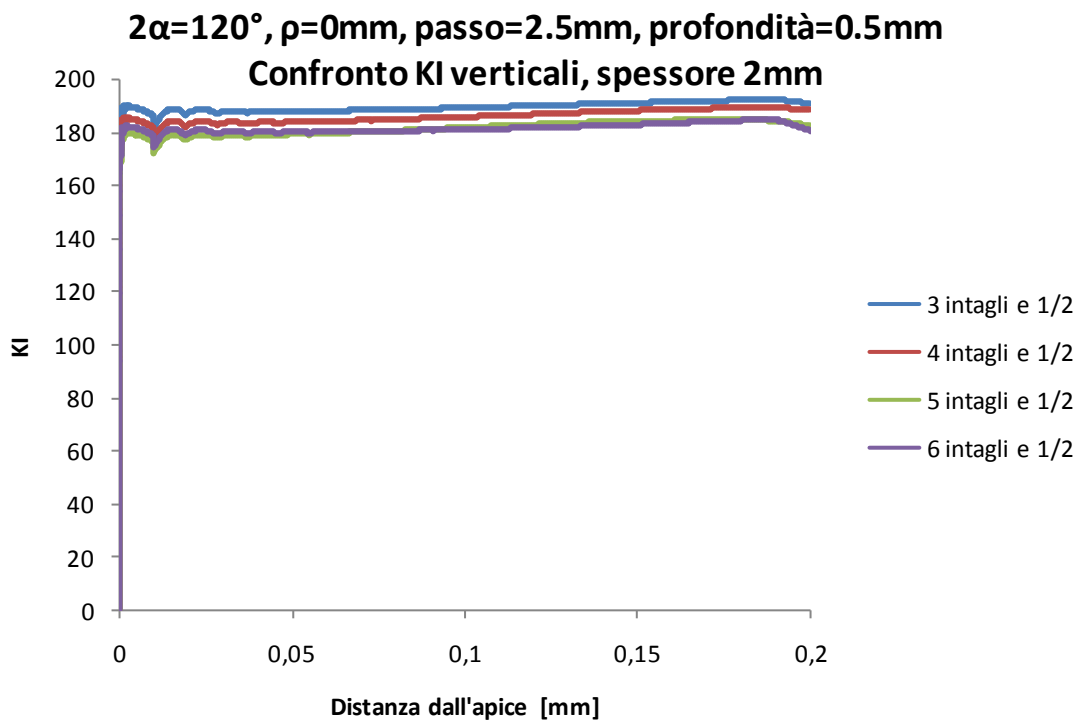


### 8.3.4 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensione calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore delle piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



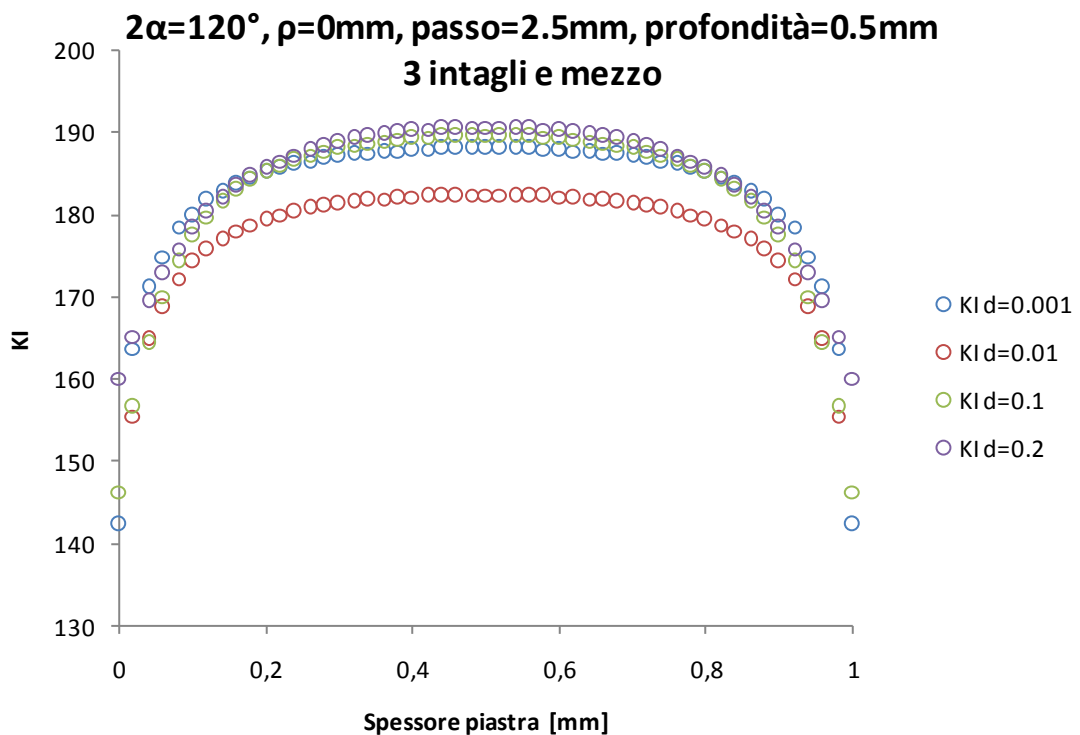
Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$  5. Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.



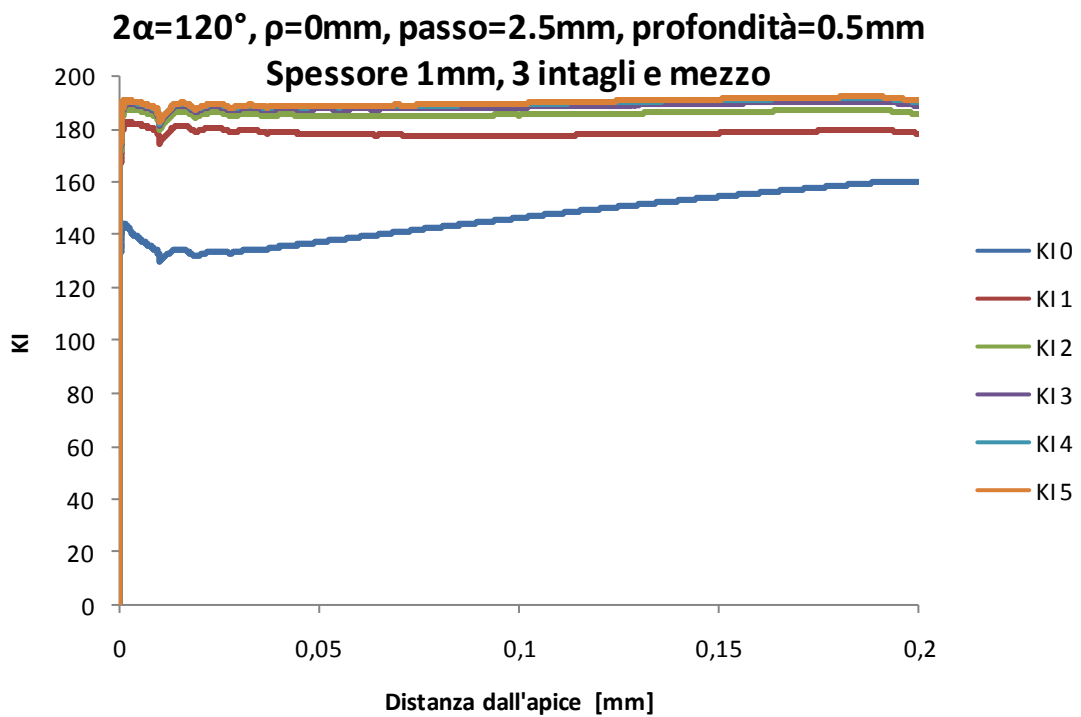
#### 8.4 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

##### 3 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



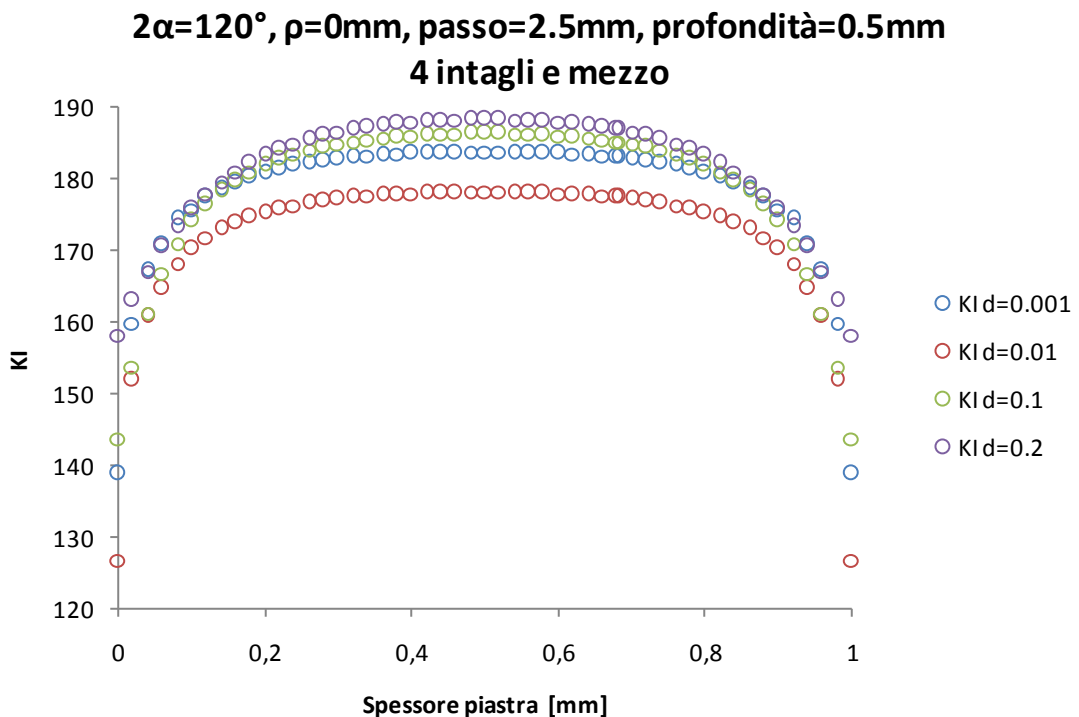
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



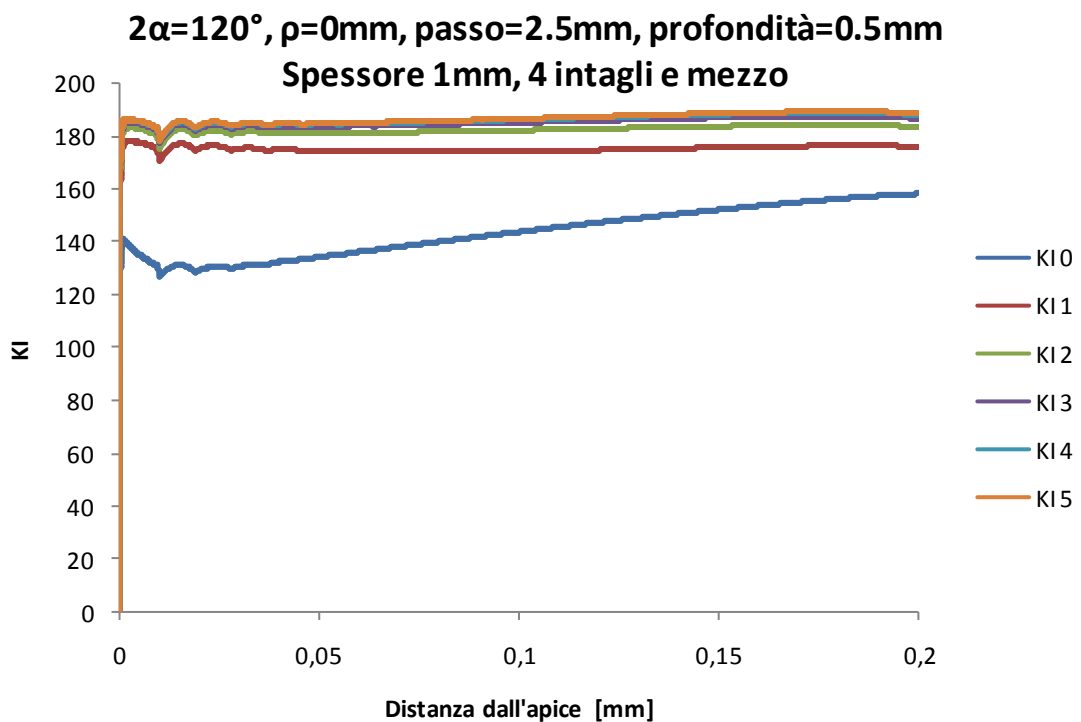
### 8.4.1 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

#### 4 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.



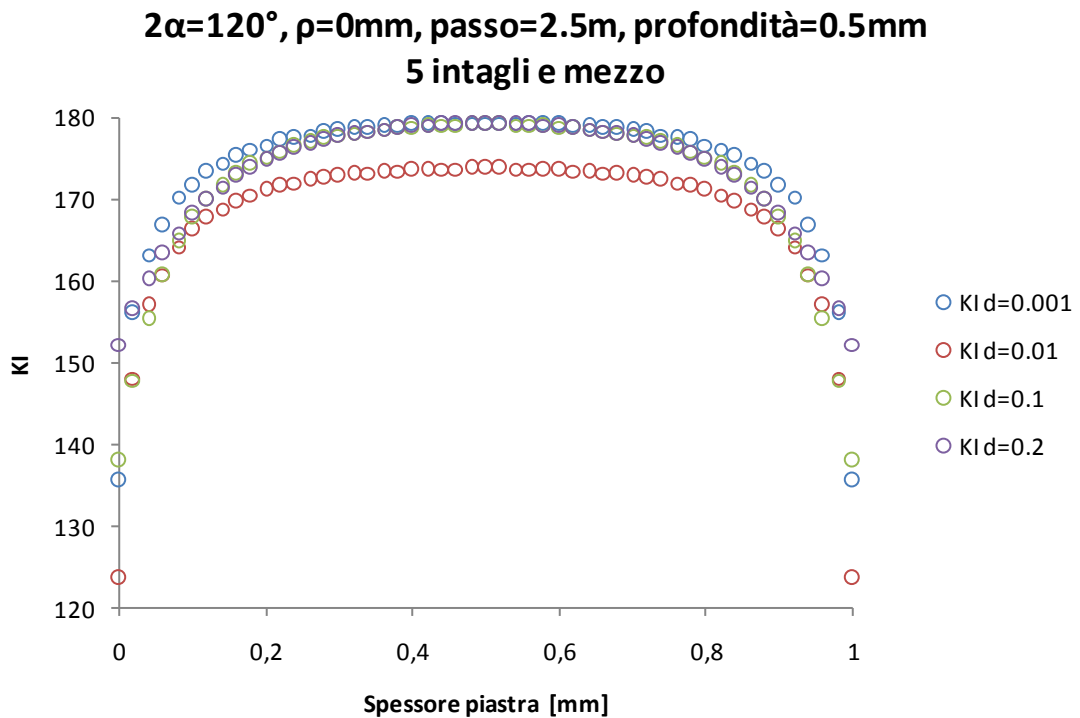
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



### 8.4.2 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

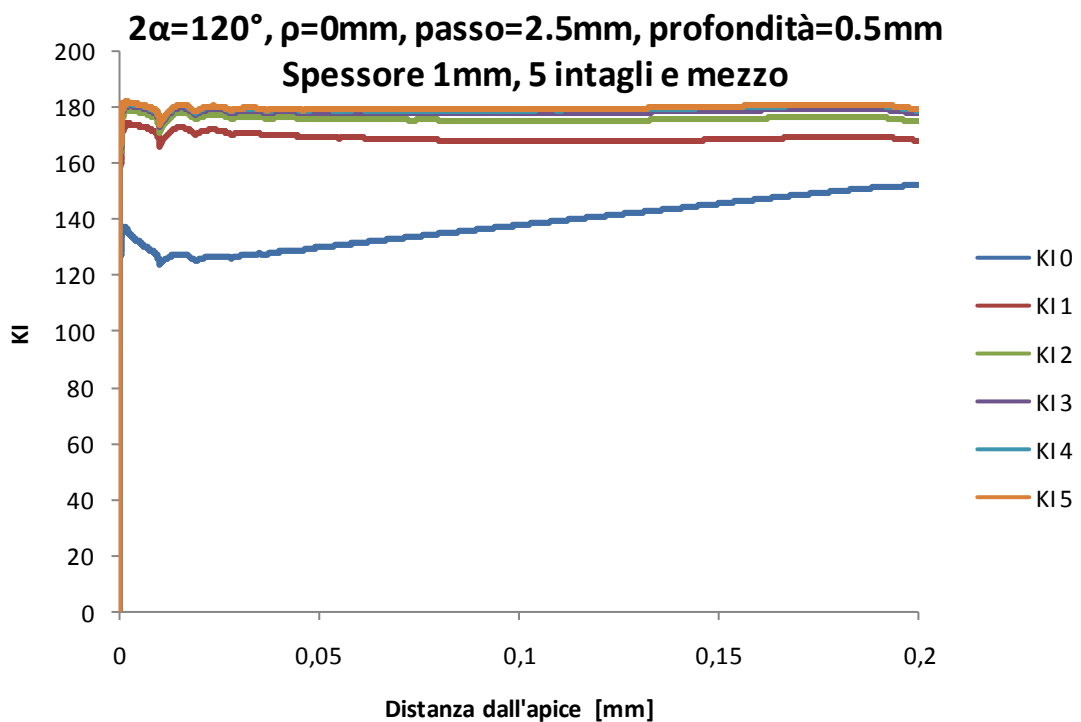
#### 5 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.





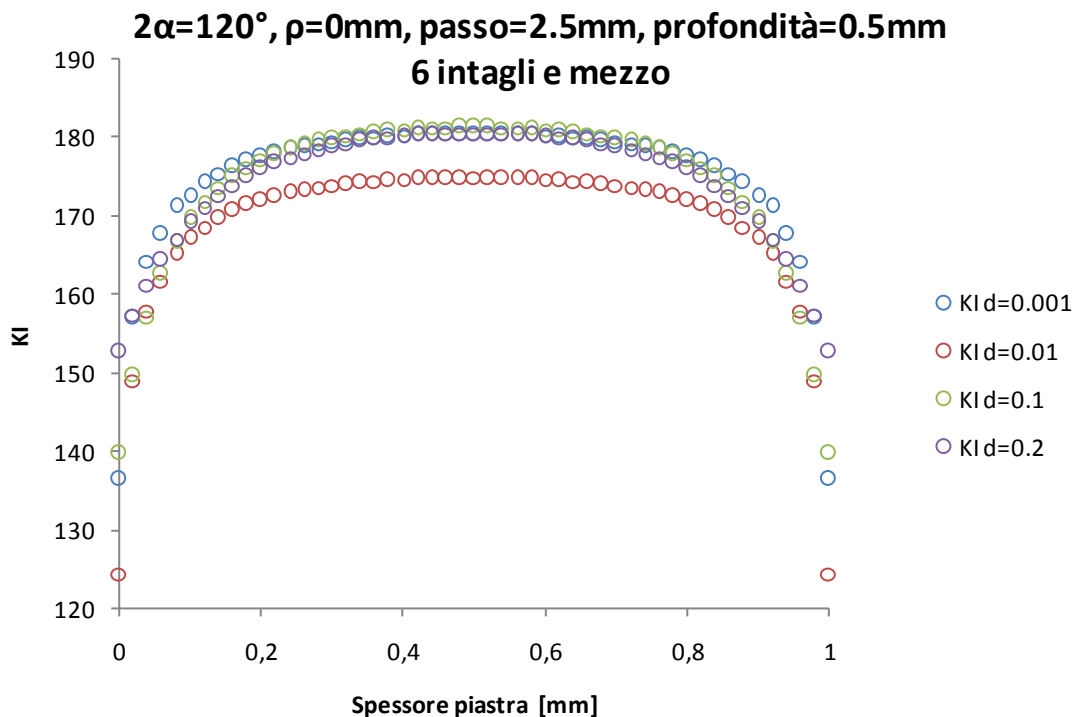
Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.



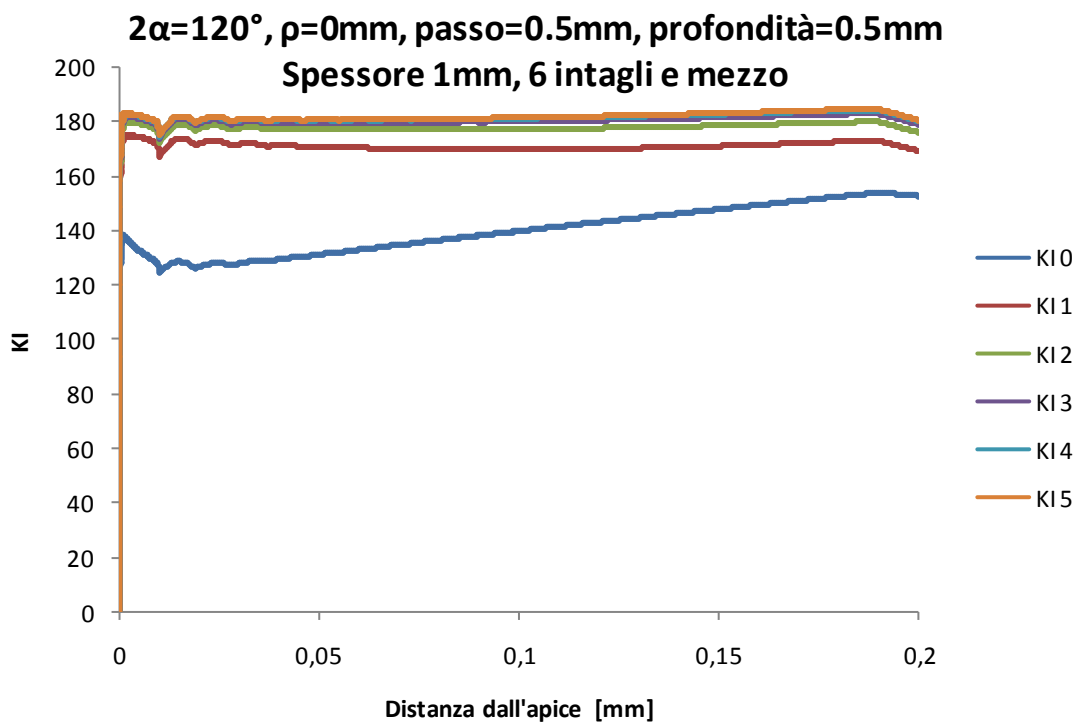
### 8.4.3 $2\alpha=120^\circ$ , $\rho=0\text{mm}$ , $p=2.5\text{mm}$ , $t=0.5\text{mm}$ , spessore 1mm,

#### 6 intagli e mezzo

Il grafico sottostante mostra i diversi andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo lo spessore a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio nel caso in cui sulla piastra siano presenti tre intagli e mezzo. I diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni presentano un andamento simmetrico in funzione dello spessore della piastra. E' da sottolineare che, nelle immediate vicinanze dell'apice dell'intaglio, precisamente per le distanze di 0.001 e 0.01mm, le tensioni sono molto elevate: nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare, ma questo è spiegabile dal fatto che il numero di elementi presi sulle distanze di 0.001 e 0.01mm dall'apice è inferiore rispetto a quelli presi per le distanze di 0.1 e 0.2mm. Inoltre, il fatto che i valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni inserendo nella formula la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore alle rispettive distanze di 0.001 e 0.01mm, sia inferiore rispetto alle distanze di 0.1 e 0.2mm, è spiegabile dal fatto che la distanza  $S$  nella formula del  $K_I$  è elevata esponenzialmente.

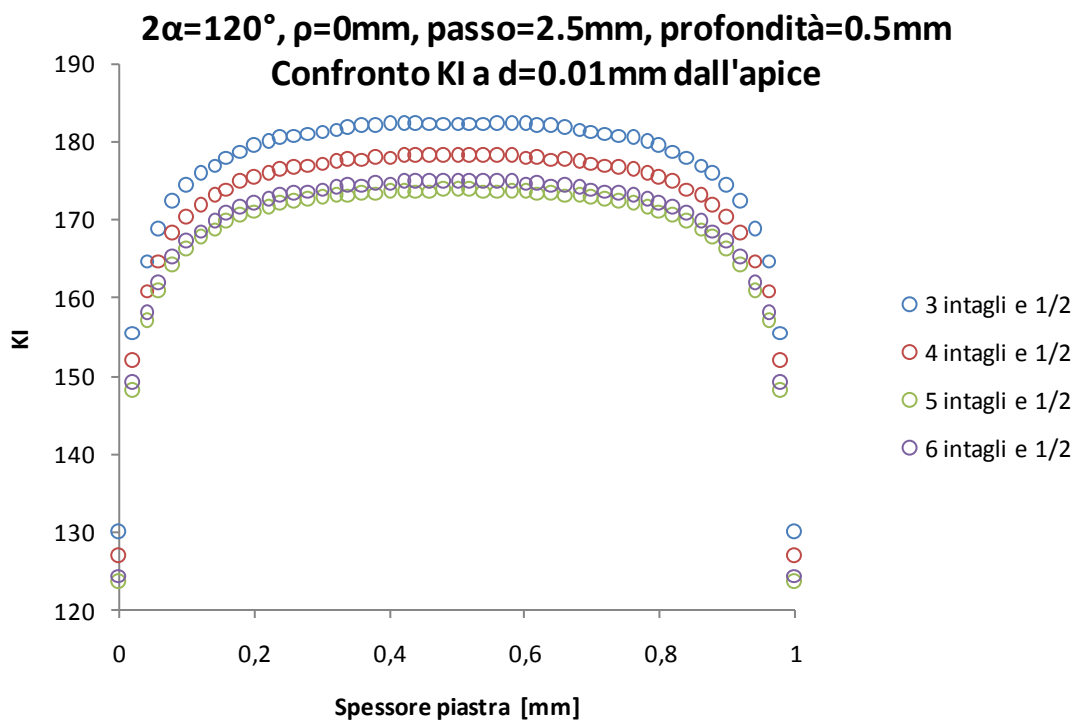


Il grafico sottostante invece mostra il diverso andamento che assume il fattore di intensificazione delle tensioni andando a plottare la tensione  $S_x$  lungo la direzione di propagazione dell'intaglio procedendo poi lungo lo spessore ad intervalli regolari di 4 suddivisioni. Siccome gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni del grafico precedente risultano simmetrici in funzione dello spessore della piastra, in questo caso non si è plottata la tensione  $S_x$  lungo tutto lo spessore, ma solamente fino in mezzeria. I diversi andamenti del  $K_I$  sono spiegabili osservando il grafico precedente in quanto la tensione  $S_x$  presenta un valore massimo di tensione in mezzeria dello spessore della piastra.

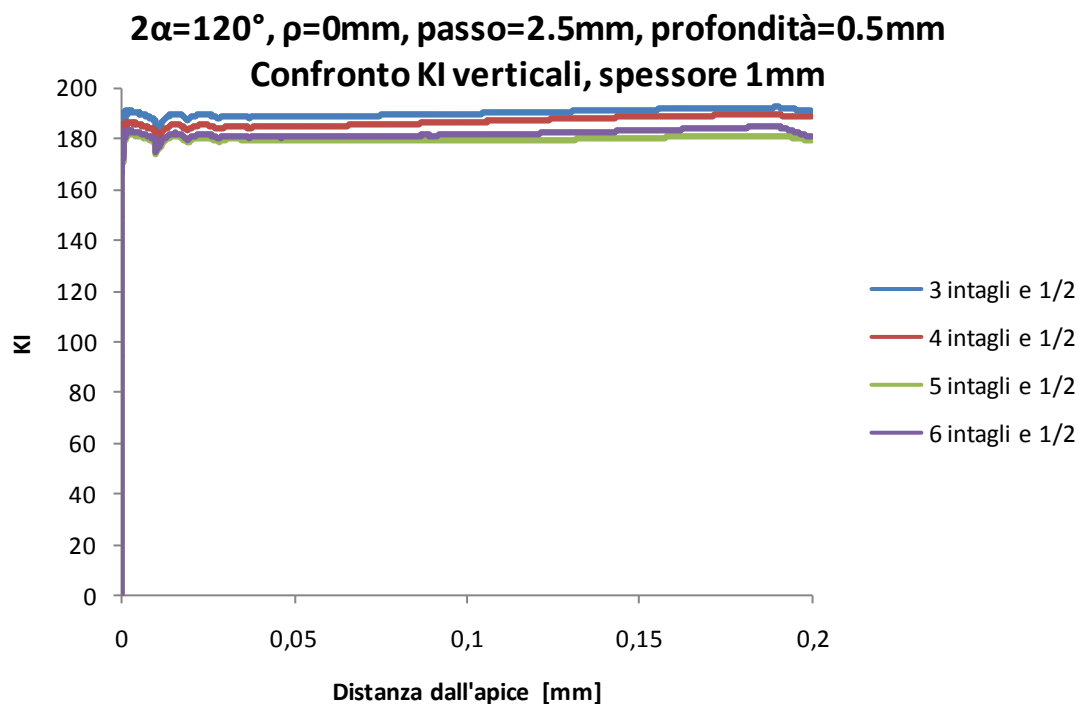


#### 8.4.4 Confronto $K_I$ orizzontali a $d=0.01\text{mm}$ dall'apice e $K_I$ verticali

Il grafico sottostante evidenzia come, incrementando progressivamente il numero di intagli sulla piastra, il fattore di intensificazione delle tensioni calcolato a delle distanze prefissate dall'apice dell'intaglio in funzione poi dello spessore della piastra, arrivi a convergenza. Per una maggior chiarezza, si sono messi a confronto solamente i diversi andamenti del  $K_I$  alla distanza prefissata di  $0.01\text{mm}$  dall'apice dell'intaglio. Come detto precedentemente, nonostante si incrementi il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione, non si ottiene un andamento del  $K_I$  del tutto regolare. Visto che l'obiettivo è quello di arrivare a convergenza, anche per questioni di velocizzare i modelli, si è trascurato il fatto di incrementare il numero di suddivisioni lungo lo spessore al momento dell'estrusione anche perché, a  $0.01\text{mm}$  dall'apice, è difficile ottenere un andamento regolare della tensione.



Il grafico sottostante invece riassume, mettendo a confronto, i diversi valori assunti dal fattore di intensificazione delle tensioni in funzione della distanza massima dall'apice dell'intaglio incrementando progressivamente il numero di intagli. Si sono riportati solamente gli andamenti che presentavano, nei grafici precedenti, i valori di fattore di intensificazione più elevato, cioè  $K_I$  5. Si può osservare dal grafico come non ci sia una grande variazione di andamento del  $K_I$  incrementando sulla piastra il numero di intagli.





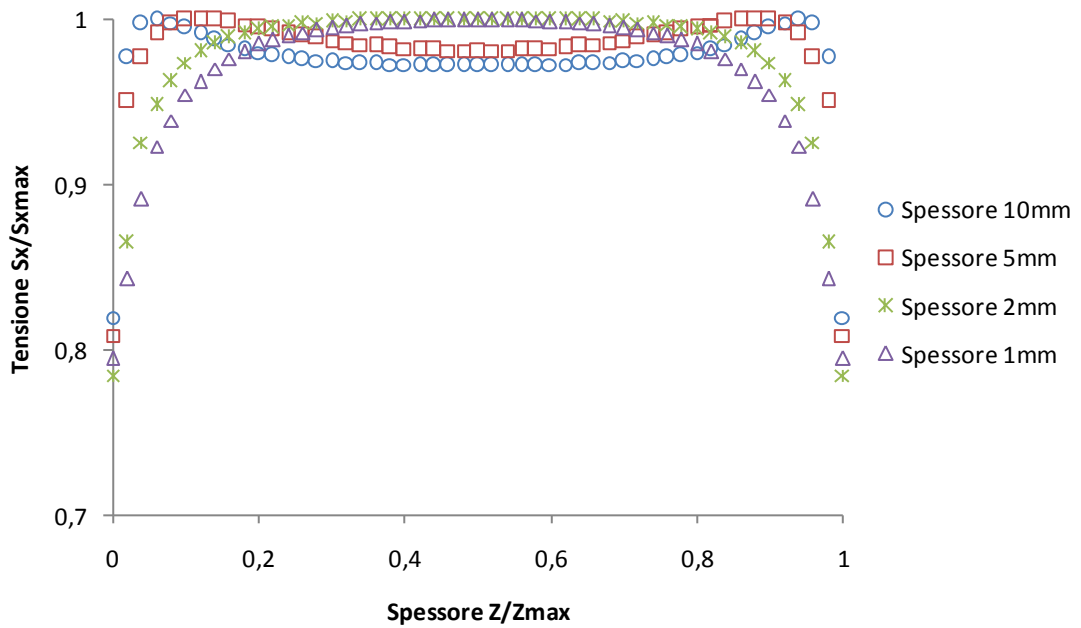
## 9. CONCLUSIONI

Si conclude il lavoro svolto presentando nuovamente i grafici normalizzati ottenuti per i diversi modelli 3-D esaminati, nei quali si sono cambiate opportunamente le principali dimensioni geometriche come il raggio all'apice dell'intaglio, l'angolo di apertura dell'intaglio e lo spessore della piastra, cercando di dare un'interpretazione ai risultati ottenuti. Dai grafici sottostanti, si può osservare come la tensione  $S_x$  plottata all'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, presenti un diverso andamento dipendente dallo spessore della piastra e dal raggio all'apice dell'intaglio. Infatti, con raggio all'apice dell'intaglio pari a 0.1mm e spessori di piastra di 10 e 5mm, si ottiene che l'andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore della piastra, presenta 2 picchi di tensione massima in prossimità dei bordi della piastra con un calo in mezzzeria, rispetto agli spessori di 2 e 1mm, i quali presentano il valore di tensione massima in mezzzeria dello spessore. Le diverse distribuzioni di tensione al variare degli spessori della piastra, avvengono in presenza di piccoli raggi all'apice dell'intaglio precisamente, nei casi studiati, quando il raggio all'apice è pari a  $\rho=0.1$  e  $\rho=0$  millimetri, ma comunque, al diminuire dello spessore, la tensione massima tende a concentrarsi in mezzzeria dello spessore della piastra.

Inoltre, nei modelli aventi raggio all'apice dell'intaglio pari ad 1mm, per tutti gli spessori di piastra analizzati indipendentemente dall'angolo di apertura dell'intaglio, la tensione  $S_x$  presenta il valore massimo sempre in mezzzeria dello spessore.

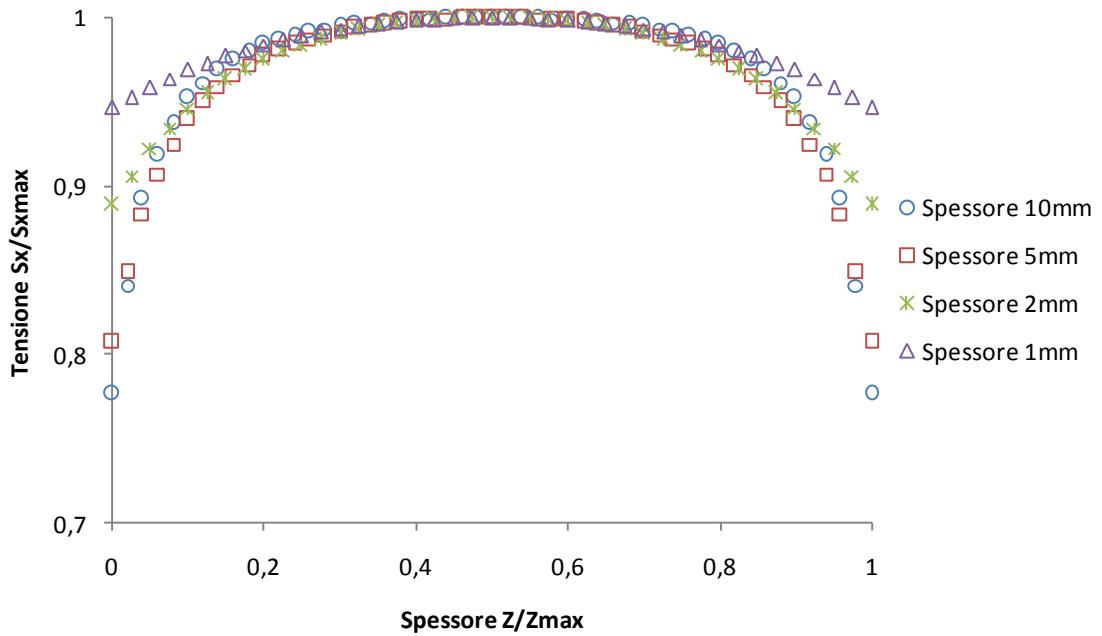
$2\alpha=60^\circ$ ,  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo=2.5, profondità=0.5

Grafico normalizzato



$2\alpha=60^\circ$ ,  $\rho=1\text{mm}$ , passo=25mm, profondità=5mm

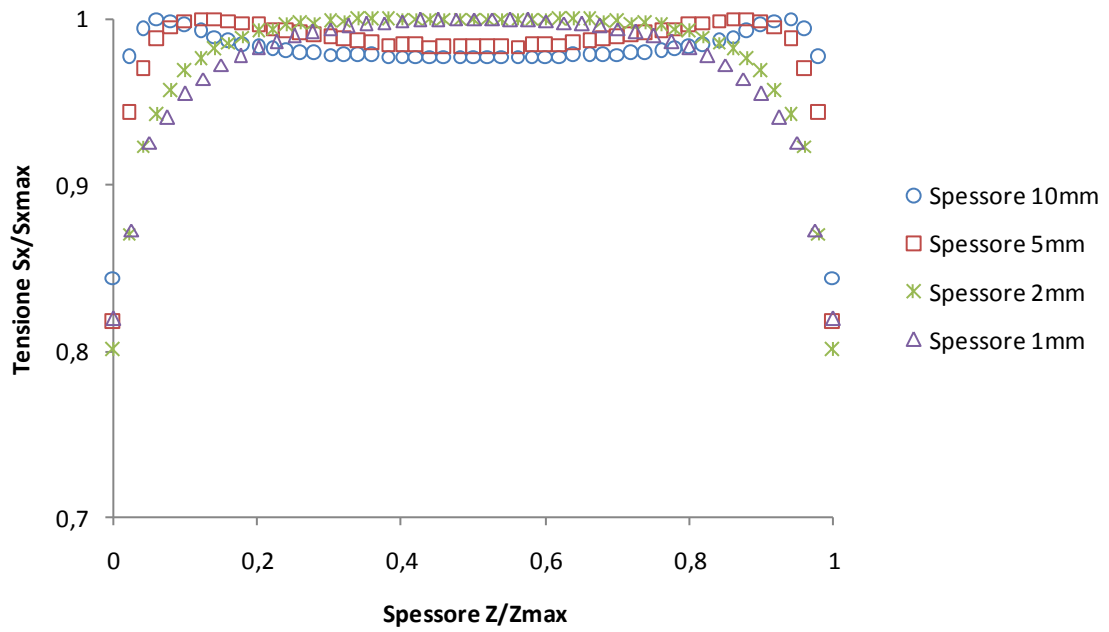
Grafico normalizzato





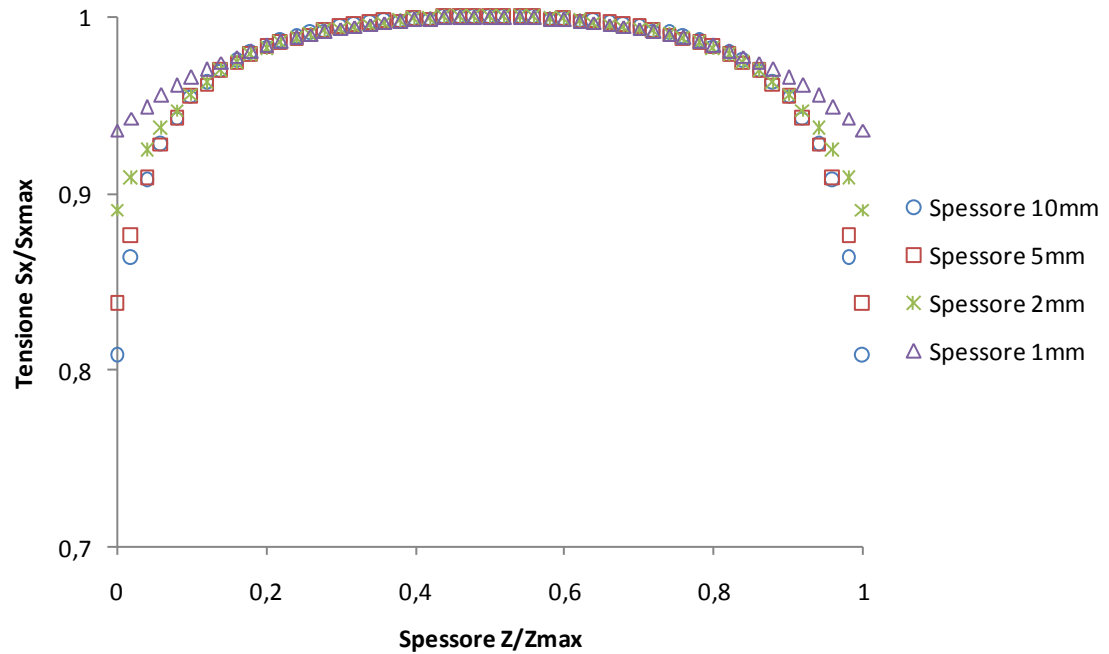
$2\alpha=120^\circ$ ,  $\rho=0.1\text{mm}$ , passo=2.5mm, profondità=0.5mm

Grafico normalizzato



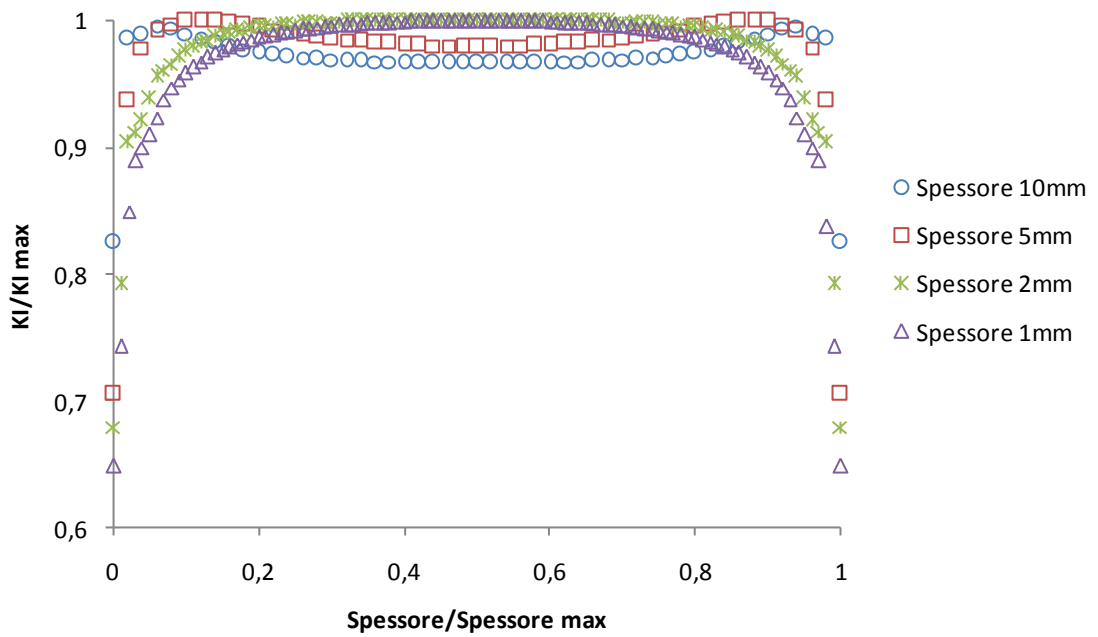
$2\alpha=120^\circ$ ,  $\rho=1\text{mm}$ , passo=25mm, profondità=5mm

Grafico normalizzato

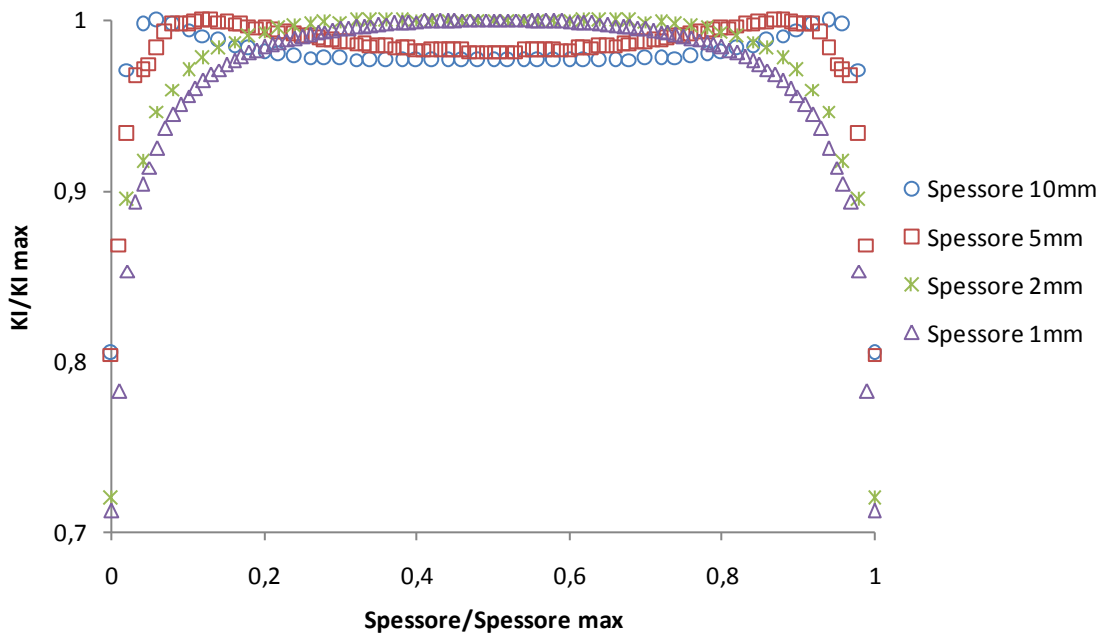


Passando invece ai modelli aventi raggio all'apice dell'intaglio pari a zero, cioè spigolo vivo, si riportano nuovamente i diagrammi normalizzati del fattore di intensificazione delle tensioni per tutti gli spessori presi in esame. Per avere una migliore visualizzazione degli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni dei vari modelli, si confronta solamente l'andamento del  $K_I$  calcolato alla distanza di 0.01mm dall'apice dell'intaglio. Si può osservare dai grafici sottostanti come la tensione  $S_x$  plottata a delle opportune distanze dall'apice dell'intaglio posizionato sull'asse di simmetria, presenti un diverso andamento che dipende dallo spessore della piastra e, come detto precedentemente, anche dal fatto che il raggio all'apice dell'intaglio è molto piccolo, in questo caso pari a zero. Infatti, per gli spessori di piastra pari a 10 e 5mm, si ottiene che l'andamento della tensione  $S_x$  in funzione dello spessore della piastra, presenta 2 picchi di tensione massima in prossimità dei bordi della piastra rispetto agli spessori di 2 e 1mm, i quali presentano il valore di tensione massima in mezzera dello spessore. Non si sono confrontati gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni calcolato lungo la direzione di propagazione dell'intaglio, per il semplice motivo che la tensione  $S_x$  plottata lungo lo spessore della piastra ad una distanza prefissata dall'apice dell'intaglio, assume andamenti diversi a seconda dello spessore stesso. Per cui, per le piastre di spessore di 10 e 5mm dove la tensione è massima in prossimità dei bordi della piastra, non lo è invece per quelle di spessore 2 e 1mm in quanto, in quest'ultime due, la tensione massima si colloca in mezzera dello spessore. Risulta quindi illogico proporre un grafico di confronto per gli andamenti del fattore di intensificazione delle tensioni calcolato lungo la direzione di propagazione dell'intaglio.

**Confronto KI orizzontali a  $d=0.01\text{mm}$  dall'apice  
 $2\alpha=60^\circ$ ,  $\rho=0\text{mm}$ , passo= $2.5\text{mm}$ , profondit =0.5mm**



**Confronto KI orizzontali a  $d=0.01\text{mm}$  dall'apice  
 $2\alpha=120^\circ$ ,  $\rho=0\text{mm}$ , passo= $2.5\text{mm}$ , profondit =0.5mm**



In generale, per tutti i modelli analizzati, si può confermare che incrementando progressivamente il numero degli intagli per ogni singolo spessore di piastra preso in esame, la tensione  $S_x$  diminuisce, mantenendo lo stesso andamento. Solo per i modelli che presentano problemi numerici, incrementando il numero di intagli, la tensione aumenta: nonostante si sia fatta la prova di convergenza della tensione aumentando il numero di elementi, confermando che la tensione massima è sulla linea di plateau, per risolvere tale problema bisognerebbe triplicare il numero di elementi del modello ma, facendo ciò, i modelli risulterebbero troppo pesanti richiedendo moltissimo tempo nella risoluzione.

## **RINGRAZIAMENTI**

Raggiunto questo importante traguardo della laurea, colgo l'occasione per ringraziare tutti coloro che mi hanno sostenuto e mi sono stati vicini in questi anni di studio e sacrifici. Prima di tutti la mia famiglia, papà Mauro, mamma Piera ed il fratello Erik che mi hanno sempre sostenuto, sia moralmente che economicamente, fin dal primo giorno che ho iniziato questo lungo cammino universitario. Un grazie speciale va a nonna Assunta che, col suo pensiero, mi è sempre stata vicina ad ogni esame che ho sostenuto. Assieme a lei, ringrazio tanto anche nonno Felice e nonna Maddalena, che da lassù, saranno sicuramente fieri ed orgogliosi di me.

Un grazie di cuore va alla mia dolce metà Elisa per aver sempre creduto in me, affiancandomi in ogni istante con le sue parole, il suo amore e la sua pazienza anche e soprattutto nei momenti più difficili.

Ringrazio tutti i miei parenti, in particolare quelli a me più cari: zio Lorenzo, zia Alessia, zio Luca.

Ringrazio il Prof. Filippo Berto per avermi seguito in questo lavoro di tesi con professionalità e pazienza, dandomi della sua disponibilità e del suo supporto fin dal primo giorno.

Un grazie speciale va a in Boscato Manuel, che purtroppo ho avuto modo di conoscere solo negli ultimi due anni di studi, ma che comunque è nato un rapporto di amicizia, fiducia e aiuto reciproco sia in ambito scolastico che nella vita quotidiana.

Grazie ad Oscar Panozzo, che mi ha sostenuto ed incoraggiato sempre, in particolare quando, ancora al primo anno di università, stavo per mollare tutto.

Ringrazio i miei due amici d'infanzia e compagni d'avventura Alessandro Crivellaro e Andrea Crestanello per aver sempre creduto in me in tutti questi anni.

Non potrei di certo omettere anche tutti gli altri amici a me carissimi: Enrico Berto (Chicco), Munaron Enrico (Dotto), Francesco Perotto, Pietribiasi Matteo (Pidri), Marsetti Matteo (Set), Crestani Riccardo (Demone), Poglietta Bruno, Paolo Zanella, Furlan Davide. Infine ringrazio tutti gli amici che ho conosciuto, riso, scherzato e sofferto insieme in questi cinque anni universitari.

A tutti un grazie di cuore.

Garzotto Denis