

---

## *Disorders in the sternal growth and pectus deformities: an experimental model and clinical correlation*

---

Sydney A. Haje<sup>1</sup>

J. Richard Bowen<sup>2</sup>

H. Theodore Harcke<sup>2</sup>

Marta E. Guttenberg<sup>2</sup>

C. Richard Bacon<sup>2</sup>

**T**he growth of the anterior chest wall has not been well explored. Controversy on this subject includes the description of sutures in the sternum by some authors. The objectives of this study are to demonstrate that cartilaginous growth plates are present between the osseous segments of the growing sternum, and that injury to these growth plates can cause pectus deformities. The anterior chest wall of normal Sprague-Dawley rats and of three children were compared grossly and histologically. An animal model in which partial epiphysiodesis of the sternal growth plates resulted in pectus deformities was developed. A case in which sternal growth disorders caused iatrogenically by surgery resulted in a pectus deformity in a child was correlated to the animal model. Cartilaginous growth plates exist between the osseous segments of the growing sternum. Injuries to such sternal growth plates result in pectus deformities. Anterior chest wall deformities can be caused by growth disturbances of the sternal growth plates. Injuries to the sternal growth plate in an animal model and injuries caused iatrogenically in a patient demonstrate the formation of pectus deformities.

**Key words** – *Pectus carinatum; Pectus excavatum; Sternum.*

### RESUMO

#### **Distúrbio do crescimento do esterno e deformidades “pectus”: um modelo experimental e correlação clínica**

O crescimento da parede torácica anterior não tem sido bem explorado. Controvérsia sobre esse assunto inclui a descrição de suturas no esterno por alguns autores. Os objetivos deste estudo são demonstrar que placas de crescimento cartilaginosas estão presentes entre os segmentos ósseos do esterno em crescimento e que lesão dessas placas pode causar deformidades *pectus*. A parede torácica anterior normal de ratos Sprague-Dawley e a de três crianças foram comparadas macroscópica e histologicamente. Foi desenvolvido um modelo experimental no qual a epifisiodesese parcial das placas de crescimento esternais resultou em deformidades *pectus*. Um caso clínico no qual o distúrbio do crescimento do esterno, causado iatrogenicamente por cirurgia, resultou em deformidade *pectus* em uma criança foi correlacionado com o modelo animal. Placas de crescimento cartilaginosas existem entre os segmentos ósseos do esterno em crescimento. Lesão dessas placas de crescimento resulta em deformidade *pectus*. Deformidades da parede torácica anterior podem ser causadas por distúrbios de crescimento das placas de crescimento esternais. Lesões dessas placas de crescimento em um modelo animal experimental e lesões causadas iatrogenicamente em um paciente demonstram a formação de deformidades *pectus*.

**Descritores** – *Pectus carinatum; Pectus excavatum; Esterno.*

---

1. Alfred I. duPont Institute, Wilmington, Delaware, EUA, e Hospital Regional da Asa Norte-Fundação Hospitalar do Distrito Federal, Brasília, DF, Brasil.

2. Alfred I. duPont Institute, Wilmington, Delaware, EUA.

*Endereço para correspondência:* Dr. Sydney A. Haje, SHIS QL 12, conj. 10, casa 18 – 71630-305 – Brasília, DF, Brasil. Tel. (061) 224-4128, fax (061) 248-6304, e-mail: orthohaje@ambr.com.br.

## INTRODUCTION

There are conflicting theories of the anatomy and growth of the anterior chest wall. The chest wall develops normally from growth of the sternum vertically, and from growth of the costal arches, horizontally. Some articles describe sutures, as in the skull, separating the osseous segments of the sternum<sup>(1,2,4,6,14,16,17,18,26)</sup>. Others describe cartilaginous growth plates, similar to the growth plates of the long bones, as the structures between the osseous segments of the sternum and at the costochondral junction of children and adolescents<sup>(9,10,12,15)</sup>. Anterior chest wall deformities, known as pectus carinatum and pectus excavatum, are thought to develop from growth abnormalities of the sternum<sup>(2,12,14-16)</sup> and costal arches<sup>(3,5,7,19,20,21,22,23,25,26,27,29)</sup>. To understand the development of these deformities, the growth of the anterior chest wall needs to be better delineated and deformities produced in animal models.

The purposes of this study were to achieve the following three goals: 1) to demonstrate grossly and histologically the normal growth of the sternum and costal arches, 2) to develop an animal model that induces pectus deformities in rats analogous to those deformities of humans, and, 3) to compare the animal model with a human case in which a similar growth disturbance caused by surgery resulted in a pectus deformity<sup>(10)</sup>.

## MATERIAL AND METHODS

### Anatomical observations in normals

Our experimental protocol was approved by the Alfred I. duPont Institute's Animal Care and Use Committee.

The anterior chest wall (sternum and costal arches) of six normal Sprague-Dawley rats, ages 2, 15, 30, 60, 90, and 180 days, were assessed grossly and histologically. The animals were sacrificed and their anterior chest wall dissected. A longitudinal midline skin incision in the sternal region was performed, the pectoral muscles were split, and the sternum and costal arches exposed. The removal of the anterior chest wall was performed through a midline clavicle osteotomy and through osteotomies of the ribs at the level of the mid axillary line. In this way, the junctions between the osseous part of the costal arches or ribs and the costal cartilages, the costochondral junctions, were also preserved for examination in the normal rats.

Sternum and sternocostal junctions specimens of human subjects were obtained at autopsy in three children ages 16 months, 3.5 years, and 6.5 years for anatomical observations and comparison with normal rat specimens. No chest wall deformity was seen at autopsy in these children. The cause of death of the first child was unknown and only a brain ventricular abnormality (narrow aqueduct) was found at autopsy. The second child died of leukemia and received

## INTRODUÇÃO

Existem teorias conflitantes sobre a anatomia e crescimento da parede torácica anterior. Esta desenvolve-se normalmente a partir de crescimento do esterno verticalmente e dos arcos costais horizontalmente. Alguns artigos descrevem suturas, como as que existem no crânio, separando os segmentos ósseos do esterno<sup>(1,2,4,6,14,16,17,18,26)</sup>. Outros descrevem placas de crescimento cartilaginosas, semelhantes às placas de crescimento dos ossos longos, como as estruturas presentes entre os segmentos ósseos do esterno e ao nível das junções costochondrais das crianças e adolescentes<sup>(9,10,12,15)</sup>. Acredita-se que as deformidades da parede torácica anterior, conhecidas como *pectus carinatum* e *pectus excavatum*, se desenvolvam a partir de anormalidades do crescimento do esterno<sup>(2,12,14-16)</sup> e arcos costais<sup>(3,5,7,19,20,21,22,23,25,26,27,29)</sup>. Para entender o desenvolvimento dessas deformidades, o crescimento da parede torácica anterior necessita ser melhor delineado e deformidades produzidas em modelos experimentais.

Os propósitos deste estudo foram atingir os seguintes objetivos: 1) demonstrar macroscópica e histologicamente o crescimento normal do esterno e arcos costais; 2) desenvolver um modelo experimental que induzisse deformidades *pectus* em ratos, análogas às deformidades dos humanos; e 3) comparar o modelo animal com um caso humano no qual um semelhante distúrbio do crescimento, causado por cirurgia, resultou em uma deformidade *pectus*<sup>(10)</sup>.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Observações anatômicas em indivíduos normais

Nosso protocolo experimental foi aprovado pelo Comitê de Uso e Cuidado Animal do Alfred I. duPont Institute.

As paredes torácicas anteriores (esterno e arcos costais) de seis ratos Sprague-Dawley normais, idades 2, 15, 30, 60, 90 e 180 dias, foram avaliadas macroscópica e histologicamente. Os animais foram sacrificados e sua parede torácica anterior, dissecada. Uma incisão longitudinal mediana foi feita na pele e subcutâneo da região esternal, os músculos peitorais separados e o esterno e arcos costais expostos. A remoção da parede torácica anterior foi feita através de osteotomia no terço médio da clavícula e de osteotomias das costelas ao nível da linha axilar mediana. Dessa forma, as junções entre a parte óssea dos arcos costais ou costelas e as cartilagens costais, ou seja, as junções costochondrais, foram preservadas para exame nos ratos normais.

Para observações anatômicas e comparação com os espécimes dos ratos normais, espécimes do esterno e junções esternocostais de seres humanos foram obtidos da autópsia de três crianças com as idades de 16 meses, 3,5 anos e 6,5 anos. Não se observou deformidade da parede torácica anterior na autópsia dessas crianças. A causa da morte da primeira criança era desconhecida e apenas uma anormalidade no ventrículo cerebral (aqueduto estreito) foi encontrada na autópsia.

chemotherapy while alive. The cause of death of the third child was a measles pneumonia plus chronic mucocutaneous candidiasis. The rat and human specimens were decalcified and embedded in parafin. Sections in the coronal plane were stained with hematoxylin and eosin for light microscopy examination.

### Experimental model

Forty-four rats, divided into groups I, II, and III were used. Twenty-three rats, weaned at 21 days of age, received early partial electrocoagulative destruction of the anterior portion of the sternal growth plates at 30 days of age. These rats comprised group I. The rats received intraperitoneal anesthesia with pentobarbital sodium (*Nembutal*, Abbott, Abbott Park, IL) (62 mg/kg of body weight). A longitudinal midline skin incision in the sternal region was performed, the pectoral muscles were split, and the sternum and costal cartilages exposed without opening of the periosteum and perichondral membranes. The growth plate, located between the manubrium and body, and the three growth plates that divide the sternal body into four segments, were identified and received electrocoagulative destruction through the use of a bovie instrument. The cartilaginous separation between the sternal body and the xyphoid process was not injured. Wound closure was performed with three or four intermittent stitches passed through the skin and pectoral muscles. Eight animals died of pneumothorax and were excluded from the study. Fifteen rats that received destruction only of the anterior portion of the growth plates (avoiding penetration into the thoracic space), survived postoperatively, and made up the total number of subjects in group I.

There were two groups of controls: 14 rats that did not receive surgery, comprising group II, and seven rats that received a sham surgery at 30 days of age, comprising group III. The surgeries for the rats in group III were performed under the same anesthesia conditions used for the rats in group I. These sham surgeries consisted of a midline longitudinal skin incision on the sternal region, splitting of the pectoral muscles, and exposing the sternum. No injuries to the sternal growth plates were provoked in this group, and the wounds were closed in the same way as in group I.

All animals were sacrificed at 90 days of age (sexual maturity in these rats occur at 8 weeks of age) and their anterior chest walls were removed. Post-sacrifice measurements of the length of the sternum (from the superior margin of the manubrium to the tip of the xyphoid) were done on the anterior aspect of the gross specimens. Radiographs of the gross specimens were taken to establish the configuration of the sternum; however, measurements were performed only directly from the specimens so that errors from radiographic magnification could be avoided. The specimens were decalcified and embedded in parafin. Sections of the sternum, sternocostal junction, costal cartilages, and costochondral junction

A segunda criança havia morrido de leucemia e recebido quimioterapia enquanto viva. A causa da morte da terceira criança foi uma pneumonia pós-sarampo mais candidíase mucocutânea crônica. Os espécimes das crianças e dos ratos foram descalcificados e embebidos em parafina. Secções no plano coronal foram coradas em hematoxilina-eosina para exame em microscópio ocular.

### Modelo experimental

Quarenta e quatro ratos, divididos em grupos I, II, e III, foram usados. Vinte e três ratos, que haviam sido desmamados aos 21 dias de idade, receberam destruição parcial por eletrocoagulação da porção anterior de suas placas de crescimento esternais aos 30 dias de idade. Esses ratos constituíram o grupo I. Os ratos receberam anestesia intraperitoneal com pentobarbital sódico (*Nembutal*, Abbott, Abbott Park, IL) (62mg/kg de peso corporal). Uma incisão longitudinal mediana foi feita na pele e subcutâneo da região esternal, os músculos peitorais separados e o esterno e arcos costais expostos sem abrir as membranas do periósteo e pericôndrio. A placa de crescimento localizada entre o manúbrio e o corpo esternal e as três placas de crescimento que dividem o corpo esternal em quatro segmentos foram identificadas e destruídas por eletrocoagulação com um cáterio. A separação cartilaginosa entre o corpo esternal e o apêndice xifóide não foi lesada. A sutura da ferida foi feita com três ou quatro pontos intermitentes passados pela pele e músculos peitorais. Oito animais morreram de pneumotórax e foram excluídos do estudo. Quinze ratos que haviam recebido destruição apenas da porção anterior das placas de crescimento (evitando penetração no espaço intratorácico) sobreviveram e compuseram o número total de indivíduos do grupo I.

Houve dois grupos-controle: 14 ratos que não receberam cirurgia compuseram o grupo II e sete ratos que receberam cirurgia simulada aos 30 dias de idade compuseram o grupo III. As cirurgias para os ratos do grupo III foram feitas sob as mesmas condições anestésicas usadas para os do grupo I. Essas cirurgias simuladas consistiram de uma incisão longitudinal mediana sobre a pele da região esternal, separação dos músculos peitorais e exposição do esterno sem provocar lesão das placas de crescimento. O fechamento das feridas foi feito da mesma forma que nos ratos do grupo I.

Todos os animais tiveram sua parede torácica anterior removida após sacrifício aos 90 dias de idade (a maturidade sexual desse ratos ocorre com 8 semanas de idade). Medidas do comprimento do esterno foram, então, feitas da margem superior do manúbrio à extremidade inferior do apêndice xifóide. Radiografias dos espécimes foram feitas para análise da forma do esterno, mas, para evitar erros provenientes de magnificação radiológica, as medidas foram feitas apenas diretamente nos espécimes. Os espécimes foram descalcificados e embebidos em parafina. Secções coronais do esterno, junções esternocostais, cartilagens costais e junções cos-

**Table 1** – Mean and standard deviation of sternal measurements

<i>Group of rats</i>	<i>Length of the sternum (cm)</i>
Group I growth plate damage (15)*	5.43 ± 0.29
Group II unoperated (14)*	6.15 ± 0.20
Group III sham surgery (7)*	6.17 ± 0.13

\* Numbers in parentheses refer to number of subjects in each group.

tions in the coronal plane were stained with hematoxylin and eosin for light microscopy examination.

One way analysis of variance (ANOVA) statistical tests were used to compare the measurements of the length of the sternum among the three experimental groups of animals. Post hoc tests were conducted using the Tukey HSD correction.

## RESULTS

### Anatomical observations in normals

No variations in the configuration of the sternum were observed in the normal rats. The gross examination of the anterior chest wall in the normal rats showed sternums with six longitudinally aligned ossified segments: the manubrium, four sternal body segments, and the xiphoid process. Sternal cartilages were observed between these osseous segments. The costal arches, horizontally aligned, were attached to the sternal cartilages through the costal cartilages, constituting the so-called sternocostal junctions at each side of the sternum.

The histologic examination of the sternal cartilage showed the presence of a pair of growth plates, one superior and one inferior, for each osseous segment of the sternal body. For the manubrium, one growth plate was observed inferiorly and for the xiphoid process, one growth plate was observed superiorly to the osseous segment. A common reserve zone was observed for each pair of growth plates of the sternal body. Regular linear growth plates yielded symmetrical sternal osseous segments in a rectangular form, vertically aligned. No sutures were observed between any of the sternal osseous segments. No synovial joints were observed at the sternocostal junctions of the examined normal rats (oldest, 180 days old). Indeed, the second, third, fourth, and fifth costal cartilages were observed as continuous with the resting zone of the sternal growth plates (fig. 1A). The costal cartilages were seen as chondroepiphyses of the ribs, extending from the cos-

**Tabela 1** – Média e desvio-padrão das medidas esternais

<i>Grupo de ratos</i>	<i>Comprimento do esterno (cm)</i>
Grupo I lesão das placas de crescimento (15)*	5,43 ± 0,29
Grupo II não operados (14)*	6,15 ± 0,20
Grupo III cirurgia simulada (7)*	6,17 ± 0,13

\* Número de indivíduos no grupo.

tocondrais foram coradas em hematoxilina-eosina para exame microscópico.

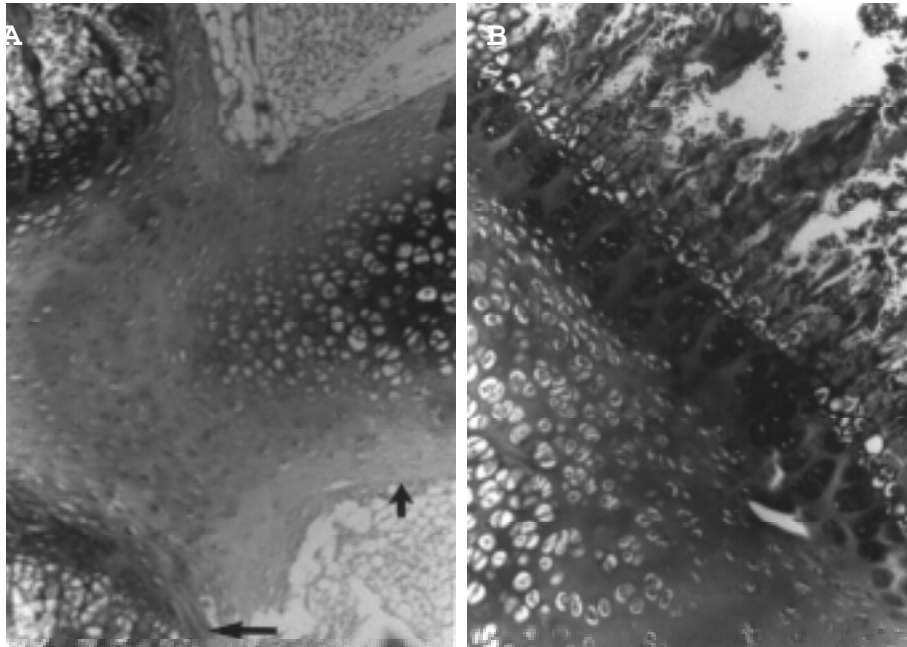
Testes estatísticos de variação única (*one way analysis of variance* – ANOVA) foram usados para comparar as medidas do comprimento do esterno entre os três grupos de ratos usados no experimento. Testes *post hoc* foram conduzidos usando-se a correção Tukey HSD.

## RESULTADOS

### Observações anatômicas em indivíduos normais

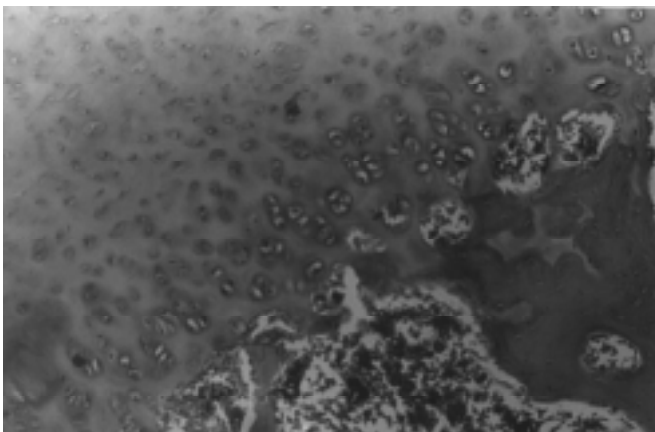
Nenhuma variação na configuração do esterno foi observada nos ratos normais. O exame macroscópico da parede torácica anterior mostrou esternos com seis segmentos ossificados, alinhados longitudinalmente: o manúbrio, quatro segmentos no corpo esternal e o processo xifóide. Cartilagens esternais foram observadas entre esses segmentos ósseos. Os arcos costais, horizontalmente alinhados, mostraram-se ligados às cartilagens esternais através das cartilagens costais, constituindo, assim, as chamadas junções esternocostais, em cada lado do esterno.

O exame histológico da cartilagem esternal mostrou a presença de um par de placas de crescimento, uma superior e uma inferior, para cada segmento ósseo do corpo esternal. Para o manúbrio, uma placa de crescimento foi observada inferiormente e, para o processo xifóide, uma placa de crescimento mostrou-se presente superiormente ao segmento ósseo. Uma zona de reserva comum foi observada para cada par de placas de crescimento do corpo esternal. Placas de crescimento lineares e regulares originavam segmentos ósseos esternais simétricos, de formatos retangulares e verticalmente alinhados. Nenhuma sutura foi observada entre os segmentos ósseos esternais e nenhuma articulação sinovial foi verificada nas junções esternocostais dos ratos normais examinados (o mais velho tendo 180 dias de idade). Na verdade, a segunda, terceira, quarta e quinta cartilagens costais foram observadas como contínuas com a zona de repouso



**Figure 1** – Coronal histologic section of the sternocostal junction of a 31-day-old rat; the thick arrow indicates the costal cartilage and the thin arrows the sternal growth plates (x 10) (A). Rib costochondral junction (costal growth plate) of a same age rat (x 10) (B).

**Fig. 1** – Seção histológica coronal da junção esternocostal de um rato com 31 dias de idade; a seta larga indica a cartilagem costal e as setas finas, as placas de crescimento esternais (x 10) (A). Junção costochondral de um arco costal (placa de crescimento costal) de um rato da mesma idade (x 10) (B).



**Figure 2** – Coronal histologic section of a sternal growth plate of a 16-month-old child (x 10). The zones of a typical growth plate, resting, proliferative, columnar, and hypertrophic zones of cartilage cells, can be observed. Endochondral ossification is occurring.

**Fig. 2** – Seção histológica coronal de uma placa de crescimento esternal de uma criança de 16 meses de idade (x 10). Uma típica placa de crescimento, com suas zonas de repouso, proliferativa, colunar e hipertrófica, pode ser observada. Ossificação endocondral está acontecendo.

tochondral junctions to the sternal growth plates. The costochondral junctions of the normal rats also appeared as growth plates at histologic examination (fig. 1B).

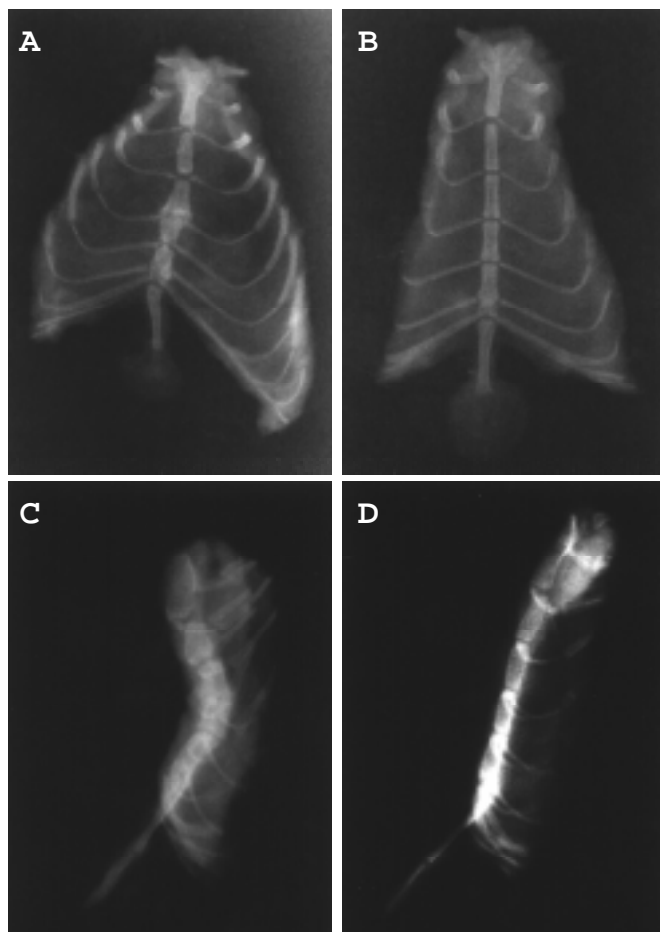
An unequal ossification of the inferior segments of the sternal body was observed in the children's sternums. The presence of cartilaginous cells arranged in columns, similar to

das placas de crescimento esternais (fig. 1A). As cartilagens costais foram vistas como condroepífises das costelas, estendendo-se desde as junções costochondrais até as placas de crescimento esternais. As junções costochondrais dos ratos normais também apareceram como placas de crescimento no exame histológico (fig. 1B).

Ossificação desigual dos segmentos inferiores do corpo esternal foi observada nos esternos das crianças. A presença de células cartilaginosas dispostas em colunas, semelhante às placas de crescimento dos ossos longos ou aos centros de ossificação dos ossos do carpo e do tarso, foi também observada nos esternos das crianças (fig. 2). Nenhuma sutura foi detectada separando os segmentos ósseos dos esternos das crianças. As junções esternocostais das duas crianças mais novas mostraram-se contínuas com a zona de reserva das placas de crescimento esternais. Uma cavidade sinovial pareceu estar-se desenvolvendo na junção esternocostal da criança de 6,5 anos de idade.

### Modelo experimental

Um encurtamento significativo do comprimento do esterno foi observado nos ratos do grupo I quando comparados com os grupos II e III ( $p < 0,0001$ ). O comprimento médio do esterno nesse grupo de ratos foi de 5,43cm ( $\pm 0,29$ ), sendo o mais curto de 5,0cm e o mais longo de 5,9cm. Anormalidades na simetria do esterno foram observadas macroscopicamente em todos os ratos do grupo I (figs. 3A e 3C). Uma



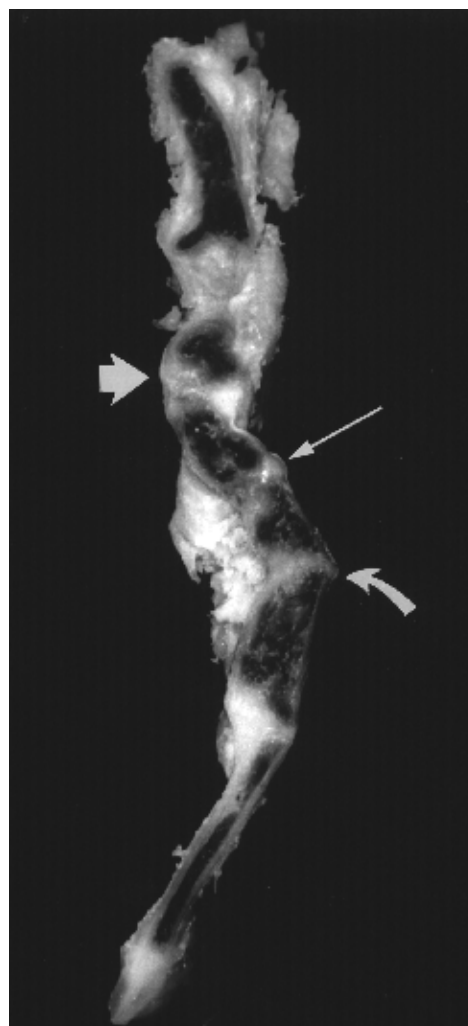
**Figure 3** – Frontal (A) and lateral (C). Group I rat specimens radiographs. Note wide sternal segments, lateral asymmetry (A), and depression (C). Normal controls are shown in B and D. (Note: The anterior tilt of the xiphoid process observed in D occurred only after detachment of the soft tissues. All control rats showed a xiphoid process aligned with the body on the lateral view before release of the soft tissues).

**Fig. 3** – Frontal (A) e lateral (C). Radiografias dos espécimes de ratos do grupo I. Notar segmentos esternais alargados, assimetria lateral (A) e depressão (C). Controles normais são mostrados em B e D. (Nota: A inclinação anterior do processo xifóide vista em D ocorreu apenas após liberação das partes moles. Todos os ratos-controles mostraram um processo xifóide alinhado com o corpo na visão lateral antes da liberação das partes moles).

the growth plates in long bones or ossification centers of carpal and tarsal bones, was also observed in the children's sternums (fig. 2). No sutures were detected separating the sternal segments of the children's sternums. The sternocostal junctions of the two younger children were continuous with the reserve zone of the sternal growth plates. A synovial cavity appeared to be developing at the sternocostal junction of the 6.5-year-old child.

#### Experimental model

A significant shortening of the length of the sternum was observed in the group I rats when compared with groups II and III ( $p < 0.0001$ ). The mean length of the whole sternum in this group of rats was 5.43 cm ( $\pm 0.29$ ), the shortest length



**Figure 4** – Sagittal section of gross specimen of a group I rat. Thick arrow indicates protrusion between the two most superior segments of the sternal body. Thin arrow shows no protrusion nor depression between intermediate segments, and the curved arrow shows depression between the most inferior segments of the sternal body.

**Fig. 4** – Secção sagital de um espécime de rato do grupo I. A seta larga mostra protrusão entre os dois segmentos mais superiores do corpo esternal. A seta fina mostra ausência de protrusão ou depressão entre os segmentos intermediários. A seta curva mostra depressão entre os segmentos mais inferiores do corpo esternal.

leve assimetria entre alguns dos segmentos esternais submetidos à epifisiodesse foi observada na radiografia frontal dos espécimes. Em nove espécimes foi observada uma depressão na região esternal, macroscopicamente e nas radiografias. Em dois desses espécimes, uma leve protrusão ocorreu na porção superior do corpo esternal e uma depressão proporcionalmente maior foi vista na macroscopia de secção sagital na porção inferior (fig. 4).

Nenhuma protrusão esternal, depressão ou assimetria entre os segmentos do corpo do esterno foi detectada nos grupos-controle de ratos (grupos II e III) (figs. 3B e 3D). O comprimento médio dos esternos no grupo II foi de 6,16cm ( $\pm 0,2$ ), sendo o mais curto de 5,9cm e o mais longo de 6,6cm. O comprimento médio no grupo III foi de 6,17cm ( $\pm 0,12$ ), sendo o mais curto de 6,0cm e o mais longo de 6,3cm.

Na tabela 1, a média e o desvio-padrão do comprimento do esterno podem ser comparados entre os grupos-controles (II e III) e o grupo I. A análise estatística não mostrou diferença entre os esternos dos grupos II e III. Já a média do

5.0 cm, and the longest length 5.9 cm. Abnormalities of symmetry of the sternum were observed grossly in all group I rats (figs. 3A & 3C). A slight asymmetry between some of the epiphysiodesed sternal segments was observed in the frontal radiographs of the specimens. In nine specimens a depression was observed in the sternal region grossly and by radiographs. In two of these specimens, a slight protrusion occurred in the superior part of the sternal body and a proportionally larger depression was seen in its inferior part in a sagittal gross section (fig. 4).

No sternal protrusion, depression, or asymmetry between the segments of the body of the sternum was detected in the control group rats (groups II and III) (figs. 3B & 3D). The mean length of the whole sternum in group II was 6.16 cm ( $\pm 0.2$ ), the shortest length 5.9 cm, and the longest length 6.6 cm. The mean length in group III was 6.17 cm ( $\pm 0.12$ ), the shortest length 6.0 cm, and the longest length 6.3 cm.

In table 1, the mean and standard deviation of the length of the sternum can be compared between the control groups (II and III) and group I. The statistical analysis showed no difference between the mean length of the sternums of groups II and III. The mean in group I when compared with the means of the groups II and III was significantly different ( $p < 0.0001$ ). Histologic examination of sagittal sections of the sternums of rats in group I showed disruption of cartilage cell columnization and nodularity of the growth plates with fibrotic replacement of the cartilage. Shortening of the osseous segments was also observed. This shortening was symmetric or asymmetric. Symmetrically shortened osseous segments showed a more extensive fibrotic replacement of the growth plates. The sternums with depression detected on the gross examination correlated histologically with preservation of columns in the posterior aspect of the growth plates. In the two instances of sternal protrusion, the growth plate was tilted so bone production was directed anteriorly.

## DISCUSSION

Conflicting information regarding the growth of the anterior chest wall is found in the literature. Sutures and coalescence or fusion of centers of ossification have been terms used to describe sternal growth<sup>(2,18)</sup>. Yamasaki & Inui<sup>(30)</sup> and Ogden *et al.*<sup>(24)</sup> reported the cartilaginous components and ossification centers of the sternum in the context of endochondral ossification. The growth of the rat rib at the costochondral junction, as a growth plate, was described by Shimomura *et al.*<sup>(28)</sup>. Gruber & Rimoin, through histologic studies of the human costochondral junction, demonstrated that the mean number of cartilage cells per column decreases with age in pediatric subjects<sup>(8)</sup>.

Our study shows no sutures between the osseous segments of the sternum. The sternum increases in length as a result of sternal growth plates. Costal growth plates are responsible for the growth of the costal cartilages and ribs of the anterior

grupo I quando comparada com as médias dos grupos II e III mostrou diferença significativa ( $p < 0,0001$ ). Exame histológico das secções sagitais dos esternos dos ratos do grupo I mostrou interrupção das colunas de células cartilaginosas, formação de nódulos nas placas de crescimento, além de substituição fibrótica da cartilagem. Encurtamento dos segmentos ósseos foi também observado. Esse encurtamento era simétrico ou assimétrico. Segmentos ósseos simetricamente encurtados mostraram substituição fibrótica mais extensiva das placas de crescimento. Os esternos com depressão detectados no exame macroscópico correlacionaram-se histologicamente com preservação de colunas no aspecto posterior das placas de crescimento. Nos dois casos de protrusão esternal, a placa de crescimento estava inclinada, de forma que a produção óssea se dirigia anteriormente.

## DISCUSSÃO

Informações conflitantes a respeito do crescimento da parede torácica anterior são encontradas na literatura. Suturas e coalescência ou fusão de centros de ossificação têm sido termos usados para descrever o crescimento esternal<sup>(2,18)</sup>. Yamasaki & Inui<sup>(30)</sup> e Ogden *et al.*<sup>(24)</sup> descreveram os componentes cartilaginosos e centros de ossificação do esterno no contexto de ossificação endocondral. A junção costocondral, como uma placa cartilaginosa de crescimento promovendo o crescimento da costela do rato, foi descrita por Shimomura *et al.*<sup>(28)</sup>. Gruber & Rimoin, através de estudos histológicos da junção costocondral de humanos, demonstraram que o número médio de células cartilaginosas por coluna diminui com a idade em pacientes pediátricos<sup>(8)</sup>.

Nosso estudo mostra que não existem suturas entre os segmentos ósseos do esterno. O esterno aumenta seu comprimento em decorrência da ação das placas de crescimento esternais. As placas de crescimento costais são responsáveis pelo crescimento das cartilagens costais e costelas na parede torácica anterior. O desenvolvimento da parede torácica anterior ocorre principalmente pelo crescimento do esterno verticalmente e pelo crescimento dos arcos costais horizontalmente devido à ação de tais placas de crescimento. Qualquer anormalidade nessas estruturas poderia resultar em crescimento desproporcional e, portanto, deformidade.

A depressão observada ou *excavatum* localizado na região esternal da parede torácica anterior dos ratos do grupo I foi causada pela destruição da porção anterior das placas de crescimento esternais. Discretas assimetrias laterais são explicadas pela destruição fora da linha média das placas de crescimento. Os dois casos de protrusões são explicados pela inclinação das placas de crescimento remanescentes pela retração fibrótica. Essas deformidades observadas nos ratos do grupo I, acompanhadas de encurtamento do esterno, correlacionam-se com observações clínicas de encurtamento do esterno em crianças com certos tipos de deformidades *pectus*.

or chest wall. Anterior chest wall development occurs mainly from growth of the sternum vertically and from growth of the costal arches horizontally due to action of such growth plates. Any abnormality of these structures could result in a disproportional growth and, therefore, deformity.

The observed depression or excavatum localized to the sternal region of the anterior chest wall of the rats in group I was caused by the destruction of the anterior portion of the sternal growth plates. Slight lateral asymmetries are explained by non-midline destruction of the growth plates. The two cases of protrusions are explained by the tilting of the remaining growth plates with fibrotic retraction. These observed deformities in the group I rats, along with shortening of the sternum, correlated with clinical observations of shortening of the sternum in children with some types of pectus deformities. Haje *et al.* have detected that in the superior type and in some inferior type of pectus carinatum in humans there is a shortening of the sternum<sup>(10,14)</sup>. In 1995 Haje reported a case of iatrogenic pectus carinatum in a child who underwent cardiac surgery when he was 27 months old; prior to that, his anterior chest wall had been normal. In the seven years post-operation, the patient developed a progressive pectus carinatum. Tomography showed that his sternum was not symmetrically aligned after the sternotomy, and that a wire suture inhibited growth of a growth plate. Similar to the observations of the animal model of this study, shortening of the sternal body was also detected when the patient was 9 years old<sup>(12)</sup>. The reported patient has been treated with an orthosis and exercises, an orthopaedic method that has been reported as successful in correcting some types of pectus deformities in patients with remaining growth potential<sup>(9,11,13-16)</sup>.

While the number of human specimens studied was small, they appear to correlate with the animal model specimens. These observations may increase understanding of how a pectus deformity may develop, and establish a basis to develop treatment.

The anterior chest wall shape depends on the growth of the sternum and costal arches. The sternal growth plates are responsible for the growth of the sternum vertically, and the costal growth plates for the growth of the costal arches horizontally. A disproportional growth disturbance provoked by injury of the sternal growth plates of rats resulted in shortening, protrusion, and/or depression deformities of the sternum. Injuries to the sternal growth plates cause pectus deformities. Pectus deformities may be caused iatrogenically during surgery by injury to the sternal and costal growth plates in children and adolescents. Avoiding growth plate injury as surgical incisions are planned and matching up the growth plates of the sternum when an osteotomy is closed may decrease the incidence.

We understand that the majority of human cases with anterior chest wall deformities have had no prior injury. They

Haje *et al.* detectaram que no tipo superior e em alguns casos do tipo inferior de *pectus carinatum* em humanos há encurtamento do esterno<sup>(10,14)</sup>. Em 1995, Haje publicou um caso de *pectus carinatum* iatrogênico em uma criança que havia sido submetida a cirurgia cardíaca aos dois anos e três meses de idade; antes disso, sua parede torácica anterior tinha aspecto normal. Sete anos após a cirurgia, o paciente havia desenvolvido um *pectus carinatum* progressivo. Tomografia mostrou que seu esterno não havia sido simetricamente alinhado depois da esternotomia e que um fio de sutura de aço segurava o crescimento de uma placa de crescimento. Semelhantemente às observações do modelo experimental desse estudo, encurtamento do corpo esternal foi também detectado quando o paciente tinha 9 anos de idade<sup>(12)</sup>. O referido paciente tem sido tratado com órtese e exercícios, método de tratamento ortopédico que tem sido descrito como bem sucedido na correção de alguns tipos de deformidades *pectus* em pacientes com potencial de crescimento remanescente<sup>(9,11,13-16)</sup>.

Embora o número de espécimes humanos estudado seja pequeno, as observações parecem correlacionar-se com as dos espécimes do modelo animal. Essas observações poderão facilitar a compreensão de como uma deformidade *pectus* pode acontecer, e estabelecer uma base para o desenvolvimento de seu tratamento.

A forma da parede torácica anterior depende do crescimento do esterno e arcos costais. As placas de crescimento esternais são responsáveis pelo crescimento do esterno verticalmente e as placas de crescimento costais, pelo crescimento dos arcos costais horizontalmente. Um distúrbio de crescimento desproporcional provocado por lesão das placas de crescimento esternais de ratos resultou em encurtamento e deformidade em protrusão e/ou depressão do esterno. Lesões das placas de crescimento esternais causam deformidades *pectus*. Deformidades *pectus* podem ser causadas iatrogenicamente durante cirurgia por lesão das placas de crescimento esternais e costais de crianças e adolescentes. Evitar a lesão dessas placas de crescimento no planejamento da incisão e procurar seu emparelhamento quando a osteotomia do esterno é fechada podem diminuir a incidência dessas deformidades.

Entendemos que a maioria dos casos de deformidades *pectus* nos humanos não tem história de lesão cirúrgica prévia. Elas normalmente são idiopáticas. Por outro lado, anormalidades das placas de crescimento, de origem congênita ou do desenvolvimento, não podem ser ignoradas. Compreender onde um distúrbio do crescimento se inicia tem importantes implicações. Como imediata consequência deste trabalho apontamos a necessidade de estudos histológicos das placas de crescimento esternais e costais de crianças e adolescentes com deformidades *pectus*. Intervenções minimizadas poderiam ser idealizadas como formas alternativas de tratamento. Epifisiodeses parciais para direcionar o crescimento das

are usually idiopathic. On the other hand, growth plates abnormalities, of congenital or developmental origins, can not be disregarded. Understanding where a growth disturbance happens has important implications. As an immediate consequence of this study, we point out the need for histologic studies of the sternal and costal growth plates of children and adolescents with pectus deformities. Minor interventions could be idealized as alternative forms of treatment. Partial epiphysiodesis to direct the growth of the involved structures surely would be a less extensive and traumatic procedure than osteochondrotomies, costal cartilage resection, fixation with exogenous materials and sternal turnover, which are currently used in the operative approaches for children with these deformities.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge Joseph Glutting, Ph.D., for the statistical analysis of this paper.

estruturas envolvidas certamente seriam menos traumáticas que osteocondrotomias, ressecção de cartilagens costais, fixação com materiais exógenos e rotação do esterno, que são as técnicas atualmente usadas nas abordagens cirúrgicas de crianças com essas deformidades.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Joseph Glutting, Ph.D., pela análise estatística deste estudo.

#### REFERENCES / REFERÊNCIAS

- Bryson, V.: Development of the sternum in screw tail mice. *Anat Rec* 91: 119-141, 1945.
- Currarino, G. & Silverman, N.: Premature obliteration of the sternal sutures and pigeon breast deformity. *Radiology* 70: 532-540, 1958.
- Ellis, D.G.: Chest wall deformities in children. *Pediatr Ann* 18: 161-162, 164, 165, 1989.
- Fischer, K.C., White Jr., R.I., Jordan, C.E., Dorst, J.P. & Neil, C.A.: Sternal abnormalities in patients with congenital heart disease. *Am J Roentgenol* 119: 530-538, 1973.
- Flesch, M.: Ueber eine seltene missbildung des thorax. *Virchows Arch F Pathol Anat* 57: 289-294, 1873.
- Gabrielsen, T.O. & Ladyman, G.H.: Early closure of the sternal sutures and congenital heart disease. *Am J Roentgenol* 89: 975-983, 1963.
- Garcia, V.F., Seyfer, A.E. & Graeber, G.M.: Reconstruction of congenital chest-wall deformities. *Surg Clin North Am* 69: 1103-1118, 1989.
- Gruber, H.E. & Rimoin, D.L.: Quantitative histology of cartilage cell columns in the human costochondral junction: findings in newborn and pediatric subjects. *Pediatr Res* 25: 202-204, 1989.
- Haje, S.A.: Pectus deformities from an orthopaedic standpoint. *Orthop Trans* 17: 977-978, 1993.
- Haje, S.A.: Deformidades pectus: novos conceitos e abordagem ortopédica em crianças e adolescentes – 1ª parte. *Rev Bras Ortop* 30: 75-79, 1995.
- Haje, S.A.: Deformidades pectus: novos conceitos e abordagem ortopédica em crianças e adolescentes – 2ª parte. *Rev Bras Ortop* 30: 143-149, 1995.
- Haje, S.A.: Iatrogenic pectus carinatum. *Int Orthop (SICOT)* 19: 370-373, 1995.
- Haje, S.A.: Letter to the Editor regarding article by Mielke, C.H. and Winter, R.E. (1993): Pectus carinatum successfully treated with bracing – A case report; in *Int Orthop (SICOT)* 17: 350-352, 1993. *Int Orthop (SICOT)* 19: 332-333, 1995.
- Haje, S.A., Antunes, E.J., Raymundo, J.L.P. & Dourado, J.N.: Pectus carinatum: enfoque atual. *Rev Bras Ortop* 23: 257-264, 1988.
- Haje, S.A. & Bowen, J.R.: Preliminary results of orthotic treatment of pectus deformities in children and adolescents. *J Pediatr Orthop* 12: 795-800, 1992.
- Haje, S.A. & Raymundo, J.L.P.: Considerações sobre deformidades da parede torácica anterior e apresentação de tratamento conservador para as formas com componentes de protrusão. *Rev Bras Ortop* 14:167-178, 1979.
- Herdner, M.: Le sternum de l'enfant. Étude radiologique des anomalies de son développement. *Rev Orthop* 33: 485, 1947.
- Kuhn, J.P.: The thorax; in Silverman, F.N. (ed.). *Caffey's Pediatric X-ray Diagnosis*, Chicago, Year Book Medical Publishers, 1985, p. 1097-1099.
- Lester, C.W.: Pigeon breast (pectus carinatum) and other protrusion deformities of the chest of developmental origin. *Ann Surg* 137:482-489, 1953.
- Lester, C.W.: Pigeon breast, funnel chest, and other congenital deformities of the chest. *JAMA* 156: 1063-1067, 1954.
- Lester, C.W.: The etiology and pathogenesis of funnel chest, pigeon breast, and related deformities of the anterior chest wall. *J Thorac Surg* 34: 1-10, 1957.
- Lester, C.W.: Pectus carinatum, pigeon breast and related deformities of the sternum and costal cartilages. *Arch Pediatr* 77: 399-405, 1960.
- Lester, C.W.: Surgical treatment of protrusion deformities of the sternum and costal cartilages (pectus carinatum, pigeon breast). *Ann Surg* 153: 441-446, 1961.
- Ogden, J.A., Conlogue, G.J., Bronson, M.L. & Jensen, P.S.: Radiology of postnatal skeletal development. II. The manubrium and sternum. *Skeletal Radiol* 4:189-195, 1979.
- Ravitch, M.M.: Operative treatment of congenital deformities of the chest. *Am Surg* 101: 588-597, 1961.
- Ravitch, M.M.: *Congenital Deformities of the Chest Wall and Their Operative Correction*, Philadelphia, WB Saunders, 1977, p. 6-7, 78-147.
- Robicsek, F., Cook, J.W., Daugherty, H.K. & Selle, J.G.: Pectus carinatum. *J Thorac Cardiovasc Surg* 78: 52-61, 1979.
- Shimomura, Y., Wezeman, F.H. & Ray, R.D.: The growth cartilage plate of the rat rib: cellular differentiation. *Clin Orthop* 90: 246-254, 1973.
- Waters, P., Welch, K., Micheli, L.J., Shamberger, R. & Hall, J.E.: Scoliosis in children with pectus excavatum and pectus carinatum. *J Pediatr Orthop* 9: 551-556, 1989.
- Yamasaki, K. & Inui, S.: Lesions of articular, sternal and growth plate cartilage in rats. *Vet Pathol* 22: 46-50, 1985.

Growth Disturbance of the Sternum and  
Pectus Deformities: an Experimental Model  
and Clinical Correlation

Sydney A. Haje, M.D.\*+

J. Richard Bowen, M.D.\*

H. Theodore Harcke, M.D.\*

Marta E. Guttenberg, M.D.\*

C. Richard Bacon, M.S.\*

\*Alfred I. duPont Institute

Wilmington, Delaware, U.S.A.

+Hospital Regional da Asa Norte -

Fundação Hospitalar do Distrito Federal

Brasília, DF, Brazil

Address correspondence to:

Dr. Sydney A. Haje

SHIS QL 12 conj 10 casa 18

Brasília - DF 71630-305

Brazil

phone: + 61-224-4128

fax: + 61-248-6304

e-mail: orthohaje@ambr.com.br

Summary: The growing of the anterior chest wall is a subject that has not been well explored. Controversy on this subject includes the description of sutures in the sternum by some authors. The objectives of this study are to demonstrate that cartilaginous growth plates are present between the osseous segments of the growing sternum, and to demonstrate that injury to these growth plates can cause pectus deformities. The anterior chest wall of normal Sprague-Dawley rats and of three children were compared grossly and histologically. An animal model in which partial epiphysiodesis of the sternal growth plates resulted in pectus deformities was developed. A case in which sternal growth disturbance, caused iatrogenically by surgery, resulted in a pectus deformity in a child was correlated to the animal model. Cartilaginous growth plates exist between the osseous segments of the growing sternum. Injuries to such sternal growth plates result in pectus deformities. Anterior chest wall deformities can be caused by growth disturbances of the sternal growth plates. Injuries to the sternal growth plate in an animal model and injuries caused iatrogenically in a patient demonstrate the formation of pectus deformities.