Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 3 (1969)

Rubrik: Theme IV: Materials; Scatter as a feature of their characteristics; Evaluation of the latter on the basis of test-data

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Streuung der Eigenschaften von Schwerbeton

The variability of the properties of normal concrete

La dispersion des qualités principales du béton

H. RÜSCH
Prof. Dr.-Ing., Dr. Ing.-E.h.

1. Ursachen der Streuung

Die Herstellung eines guten Betons ist sicher einfacher als die Herstellung eines guten Stahles, weil sowohl die Eigenschaften der Ausgangsstoffe als auch die thermischen Einflüsse eine viel geringere Rolle spielen. Eine gleichbleibende Qualität des Zements, die Konstanz des Wasserzementwertes und eine zweckmäßig gewählte Konsistenz sind fast die einzigen Anforderungen, die zur Gewährleistung gleichbleibender Eigenschaften des Betons erfüllt werden müssen. Trotzdem sind die in der Praxis beobachteten Streuungen, wie im folgenden im einzelnen gezeigt werden soll, beim Beton eher größer als beim Stahl, weil die Fertigung auf der Baustelle unter teilweise primitiven Umständen und mit ungenügender Kontrolle erfolgt, deren Ergebnisse zudem erst bekannt werden, wenn es zu spät ist. Umso wichtiger ist es, einen Überblick über die Größe der zu erwartenden Streuungen und ihre Ursachen zu gewinnen.

Bei den Ursachen muß man unterscheiden zwischen den Einflüssen, die bei der Bereitung des Betons entstehen und jenen, die mit dem Einbau in das Bauwerk und der Nachbehandlung verbunden sind. Die üblichen Standardprüfungen erfassen nur die erstgenannte Gruppe, während die Auswirkungen der zweiten uns derzeit leider noch weitgehend verborgen bleiben, weil wir über keine befriedigende Methode verfügen, um die Festigkeit des im Bauwerk eingebauten Betons auf einfache und das Bauwerk nicht schädigende Weise zu bestimmen.

Die nachstehenden Ausführungen befassen sich deshalb vorwiegend mit jenen Streuungen, die bereits bei der Bereitung des Betons entstehen. Es sollen aber auch einige Angaben folgen, wie man von den Eigenschaften der Standardproben auf jene des eingebauten Betons schließen kann, sofern er mit der üblichen Sorgfalt verdichtet wurde.

Die Ursachen für die Streuung der an Standardproben bestimmten Eigenschaften des Betons sind in Tabelle I schematisch dargestellt (siehe auch [1]). Eine solche Zusammenstellung ist sehr nützlich, wenn man nach Möglichkeiten suchen will, die Streuung zu begrenzen.

In der ersten Gruppe der Ausgangsstoffe spielt die Streuung der Zementfestigkeit die weitaus größte Rolle. Der Variationskoeffizient $V = s/\bar{x}$ liegt erfahrungsgemäß zwischen 4 und 2o %, je nachdem ob der Zement von einem hochmodernen Werk mit automatischer Rohstoffkontrolle oder von einem Werk mit veralteter Ausrüstung und ungünstiger Rohstofflage bezogen wird. Leider erlauben uns wirtschaftliche Gründe meist nicht, die Ausgangsstoffe von den besten Quellen zu beziehen. Man muß in der Nähe der Verarbeitungsstelle gewonnene Stoffe verwenden.

Streuung der Betonmischung		Streuung bei der Prüfung		
1. Eigenschaften der Rohstoffe	2. Mischungszusammensetzung	3. Herstellung der Prüfkörper	4. Pflege der Probekörper	5. Festigkeitsprüfung
1.1 Wechselnde Zementfestigkeit	2.1 Ungenauigkeit der Zementzugabe	3.1 Unvollkommene Durchmischung	4.1 Unterschiedliche Erhärtungstemperatur	5.1 Steifigkeit und Drehbarkeit der Druckplatten der Prüfpresse. Genauigkeit der Meßeinrichtung
1.2 Streuung der Festigkeit der Zuschläge	2.2 Ungenauigkeit der Wasserzugabe	3.2 Entmischung beim Transport oder beim Verdichten	4.2 Unterschiedliche Austrocknung	5.2 Unebene Druckflächen der Prüfkörper
1.3 Wechselnde Kornzusammensetzung	2.3 Mangelhafte Berücksichtigung der Eigenfeuchte der Zuschläge	3.3 Unvollkommende Verdichtung der Prüfkörper	4.3 Unterschiede in der Aufbewahrungsart während des Erhärtens	5.3 Unvollkommene Zentrierung
1.4 Wechselnde Kornfeuchte	2.4 Absichtl. Änderung der Wasserzugabe zur Veränderung der Konsistenz der Mischung	3.4 Zufällige Lage von großen Körnern in der Nähe der zukünftigen Prüfflächen		5.4 Ungleiche Prüfgeschwindigkeit
	2.5 Ungenaue Abmessung der Zuschlagsfraktionen			5.5 Ablesefehler
	2.6 Einflüsse von zeitweise zugegebenen Zusatzmitteln			

Tabelle I: Einflüsse auf die Streuung der Betonfestigkeit von Prüfkörpern

Bei der zweiten Gruppe, den Einflüssen auf das Mischungsverhältnis, kommt es vor allem auf das Wasserzementverhältnis an. Durch zuverlässige Einrichtungen für das Zumessen der einzelnen Komponenten, witterungsgeschützte Lagerung des Sandes und Kontrolle seiner Eigenfeuchtigkeit,kann man die Streuung der Betoneigenschaften sicher am stärksten verringern. Wenn zusätzlich noch der Wasserzementwert des Frischbetons laufend kontrolliert wird, können Abweichungen vom Sollwert sofort beseitigt werden und treten nicht erst bei der Festigkeitsprüfung der Betonproben nach Wochen in Erscheinung.

Die folgenden Gruppen 3 bis 5 sind von viel geringerem Einfluß. Sie betreffen außerdem nur die Zuverlässigkeit des Prüfverfahrens, haben aber nichts mehr mit den Eigenschaften des Bauwerksbetons zu tun.

2. Das statistische Verteilungsgesetz der Betonfestigkeit

Man muß zwischen zufälligen und systematischen Einflüssen unterscheiden. An dieser Stelle interessieren in erster Linie die zufälligen Schwankungen, die durch nicht erkennbare, oder unter den gegebenen Voraussetzungen nicht vermeidbare, zufällige Abweichungen von den Sollwerten entstehen. Die Erfahrung hat gelehrt, daß die Gauß'sche Normalverteilung in der weit überwiegenden Zahl der uns hier interessierenden Fälle die wirkliche statistische Verteilung der Merkmale völlig befriedigend erfassen kann. Dies ist von vornherein nicht selbstverständlich. Die Gauß-Verteilung ist symmetrisch und setzt voraus, daß jeder zwischen $+\infty$ und $-\infty$ liegende Wert auftreten kann. Festigkeitswerte können aber höchstens zwischen o und $+\infty$ fallen. Ihre Verteilung ist also notwendigerweise unsymmetrisch. Man kann diesen Mangel abstellen, indem man eine Normalverteilung der Logarithmen annimmt. Dies ist aber umständlich und lohnt sich nur, wenn der Variationskoeffizient ungewöhnlich groß wird ($V > o,4$). Es wurde mehrfach nachgewiesen [2 , 4], daß bei geringerer Streuung der mit dem logarithmischen Verteilungsgesetz erreichbare Gewinn an Genauigkeit den Vorteil der einfacheren Handhabung der numerischen Normalverteilung kaum aufwiegen kann.

Unter systematischen Einflüssen soll all das verstanden werden, was absichtlich oder zumindest bewußt die Eigenschaften verändert. Hierunter fällt z.B. eine absichtlich vergrößerte Wasserzugabe, welche die Verarbeitung des Betons erleichtern soll. Weitere systematische Einflüsse sind eine Änderung der Bezugsquelle für die Rohstoffe oder ein wesentlicher Wechsel im Personal. In all diesen Fällen weiß man, daß sich die Fertigungsgrundlage geändert hat, was sowohl eine Verschiebung des Mittelwertes $\bar{x}$ als auch eine Änderung der Standardabweichung s zur Folge haben kann. Eine gemeinsame Auswertung der auf verschiedenen Grundlagen beruhenden Ergebnisse würde zu einer von der Normalverteilung abweichenden Verteilung führen.

3. Das Zusammenwirken der einzelnen Streuungseinflüsse

Für das Zusammenwirken der in Tabelle I aufgezählten Streuungseinflüsse kann, soweit sie zufallsbedingt sind, das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz (variance law) angewendet werden. Dies ist erfahrungsgemäß eine befriedigende Näherung.

$$s^2 = s_1^2 + s_2^2 + \dots s_n^2 \quad \text{oder} \quad V^2 \approx V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2 \qquad (1)$$

Diese Gleichung sagt, daß nur die großen Streuungen von entscheidendem Einfluß sind. Unterstellt man z.B., daß sich die Streuung der Rohstoffeigenschaften (vor allem der Zementfestigkeit) in der Betonfestigkeit mit V = 6 %, die Fehler in der Mischungszusammensetzung mit V = 12 % und die mit der Prüfung verbundenen Fehler mit V = 4 % bemerkbar machen, erhält man für die Gesamtstreuung einen Variationskoeffizient von $V = \sqrt{36 + 144 + 16} = 14$ %, der nur wenig über den der Mischungsstreuung zugeschriebenen 12 % liegt.

4. Der Einfluß der Probenform auf die Druckfestigkeit

Die höchste Festigkeit beobachtet man an kleinen Würfelproben, die kleinste an großen und schlanken Zylindern oder Prismen. Der systematische Einfluß der Probenform und -größe auf die beobachtete Festigkeit ist nur in geringem Maße auf eine unterschiedliche Verdichtung des Betons (Gruppe 3 in Tabelle I) zurückzuführen. Vorherrschend ist die festigkeitserhöhende Wirkung der behinderten Querdehnung. Dieser Einfluß hängt nicht nur von der Steifigkeit der Druckplatten der Prüfpresse ab, sondern sinkt auch mit der von der Probengröße und -festigkeit wachsenden Beanspruchung dieser Platten.

Die nachstehenden, auf Angaben der RILEM beruhenden Umrechungszahlen gelten für eine mittlere Betongüte [5] .

Art des verwendeten Prüfkörpers	Abmessungen (cm)	Umrechnungsfaktor auf einen Zylinder 15x3o cm		Variationskoeffizeint (%)
		Schwankungsbereich	zulässige Mittelwerte	
Zylinder	15 x 3o	-	1,oo	5,5
	1o x 2o	o,94 bis 1,oo	o,97	-
	25 x 5o	1,oo bis 1,1o	1,o5	5,o
Würfel	1o	o,7o bis o,9o	o,8o	6,o
	15	o,7o bis o,9o	o,8o	-
	2o	o,75 bis o,9o	o,83	4,o
	3o	o,8o bis 1,oo	o,9o	3,5
Prismen	15 x 15 x 45	o,9o bis 1,2o	1,o5	6,o
	2o x 2o x 6o	o,9o bis 1,2o	1,o5	-

Tabelle II: Umrechnungszahlen für den Einfluß der Probenform auf die Druckfestigkeit

5. Die Streuung der an Proben bestimmten Betonfestigkeit

Neuere statistische Untersuchungen, z.B. [2, 3, 4] haben sich mit der Frage beschäftigt, ob für die in Tabelle I aufgezählten Streueinflüsse Gesetzmäßigkeiten erkannt werden können. Dies ist tatsächlich der Fall.

Die mit der Prüfung der Festigkeitsproben verbundene Standardabweichung s_p (Gruppen 3 bis 5 der Tabelle I) kann man aus der unterschiedlichen Festigkeit

von Proben ableiten, die der gleichen Mischung entnommen wurden. Sie wächst annähernd linear mit der mittleren Betonfestigkeit $\bar{ß}$.

$$s_p = k \cdot \bar{ß} \qquad (2)$$

Die Proportionalitätskonstante k beträgt für 2o cm Würfel im Mittel etwa o,o4 [2, 4, 6]. Die von der Sorgfalt abhängigen Einzelwerte schwanken zwischen o,o2 und o,15. Wie die zugefügte letzte Spalte von Tabelle II zeigt, wird s_p bei zylindrischen und kleinen Prüfkörpern eher größer.

Der von der Zusammensetzung der Betonmischung abhängige Streuungsanteil (Gruppen 1 und 2 der Tabelle I) hängt in erster Linie von der Schwankung der Zementfestigkeit und des Wasserzementwertes ab. Er läßt sich nicht ohne weiteres separieren. Man kann nur so vorgehen, daß man die mittlere Gesamtstreuung $\bar{s}$ bestimmt und anschließend den mittleren Einfluß der Prüfstreuung $\bar{s}_p$ abzieht.

$$\bar{s}_m = \sqrt{\bar{s}^2 - \bar{s}_p^2} \qquad (3)$$

In Bild 1 wurden rund 8oo Werte der bei der Baukontrolle beobachteten Gesamtstreuung, die mit Hilfe einer internationalen Rundfrage [4] gewonnen wurden, über der zugehörigen mittlerenBetonfestigkeit aufgetragen. Man sieht, daß $\bar{s}$ mit wachsender Betonfestigkeit zuerst etwa einer Parabel folgend ansteigt und für $\bar{x} > 25o$ kp/cm^2 einen konstanten Wert annimmt, der bei 5o kp/cm^2 liegt. Die Einzelwerte fallen zwischen s = 1o bis 1oo kp/cm^2.

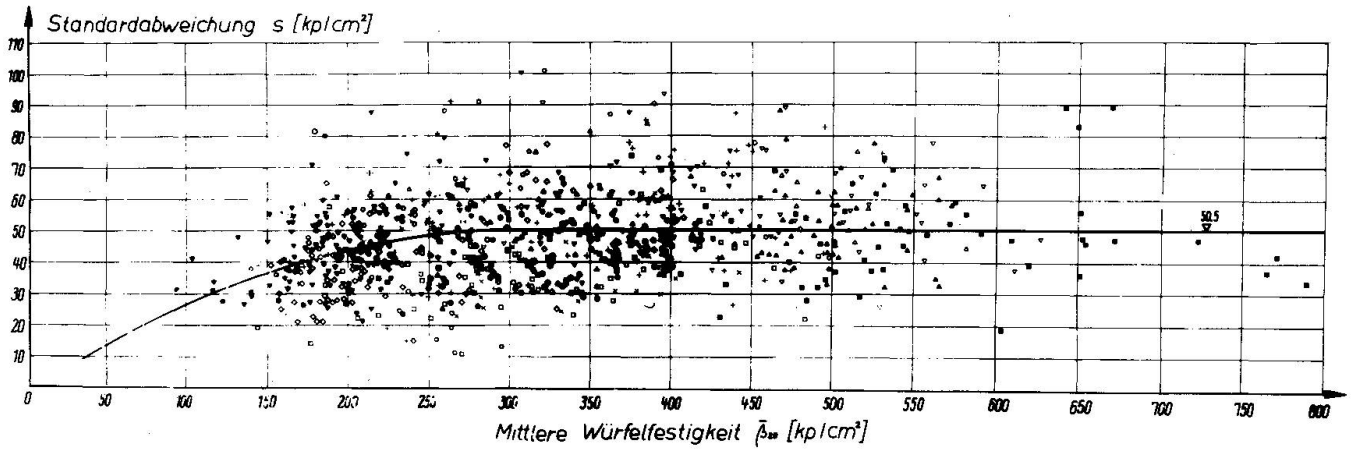


Bild 1: Die Abhängigkeit der Standardabweichung s der Würfelproben vom Mittelwert

Die Höhenlage des konstanten Wertes hängt sicher wesentlich von der maschinellen Ausrüstung der Baustelle, der Qualität der Rohstoffe, der Sorgfalt des Personals, aber nicht zuletzt auch von Witterungseinflüssen ab. Das läßt Bild 2 deutlich erkennen, in dem der Mittelwert der Streuung für verschiedene Arten von Baustellen nach [4] über der mittleren Festigkeit aufgetragen wurde. Am günstigsten schneidet der Lieferbeton ab. Im Tunnelbau sind die Witterungseinflüsse meist gering. Der Massenbeton müßte eigentlich wegen der Mechanisierung der Betonbereitung besser abschneiden. Solche Baustellen laufen aber meist mehrere Jahre. Eingehende Untersuchungen [4] haben gezeigt, daß bei langdauerndenBaustellen s während der Einarbeitungs-

zeit verhältnismäßig groß ist, dann auf einen günstigen Wert absinkt und im Laufe der Zeit wegen des Nachlassens der Sorgfalt und zunehmenden Witterungseinflüssen wieder ansteigt.

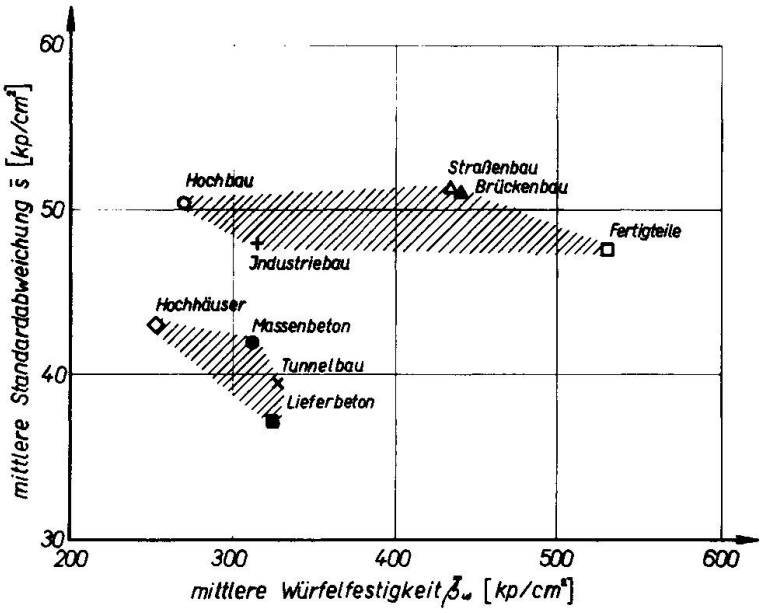


Bild 2: Mittlerer Einfluß der Art der Baustelle auf die Standardabweichung und Betonfestigkeit

In der zweiten Gruppe von Bild 2 finden sich vorwiegend Bauten mit verhältnismäßig kurzer Bauzeit. Dies gilt auch für die Fertigteile, die zum großen Teil auf der Baustelle hergestellt wurden. Nur der Straßenbau macht eine Ausnahme. Sein hochliegender Wert dürfte vor allem den Witterungseinflüssen zuzuschreiben sein.

In einer weiteren Untersuchung [4] wurde festgestellt, daß das Prüfalter der Proben keinen direkten Einfluß auf die Standardabweichung hat. Mit wachsendem Alter wird nur die mittlere Festigkeit und damit nach Bild 1 unterhalb $\bar{\beta}_w = 25o$ auch die Standardabweichung größer.

Wenn man mit Hilfe der Gleichungen (2) und (3) die Mischungsstreuung s_m von der Gesamtstreuung s separiert, kann man mit Hilfe des Sorgfaltbeiwertes $c = s_m/\bar{\sigma}_m$ neue Kurven für die Abhängigkeit der Gesamtstreuung von der Betonfestigkeit konstruieren. Dabei kann man davon ausgehen, daß unabhängig von der Sorgfalt, die bei der Bereitung des Betons aufgewendet wird, die Prüfstreuung $V_p = o,o4$ ist. Die neuen Werte $\sqrt{s_p^2 + (c \cdot \bar{s}_m)^2}$ sind inBild 3 dargestellt.

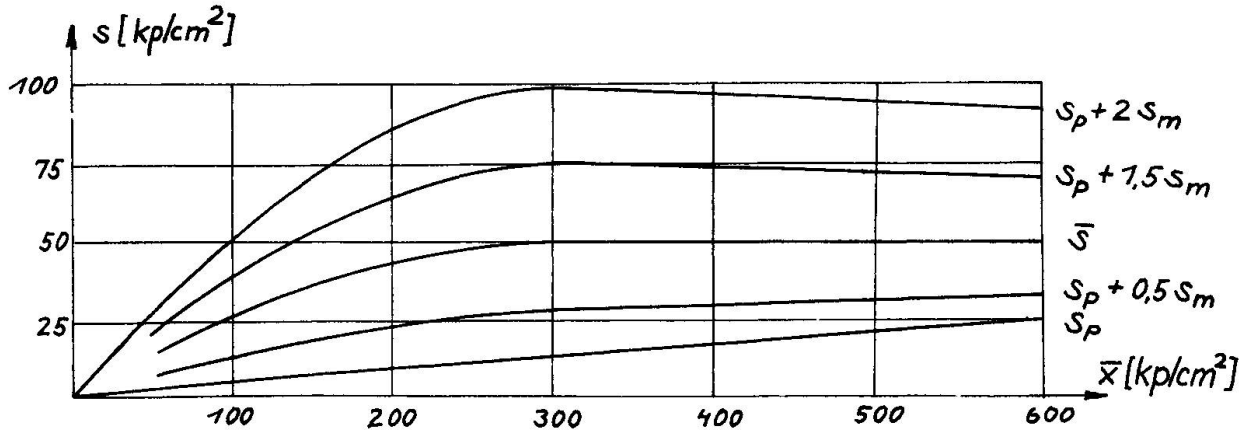


Bild 3: Vermutete Abhängigkeit der Standardabweichung s von der mittleren Würfelfestigkeit und der Sorgfalt bei der Herstellung

Demnach dürfte bei sehr sorgfältiger Arbeit die Standardabweichung der hohen Betongüten nicht mehr konstant sein, sondern eher linear anwachsen. Diese theoretisch abgeleitete Vermutung wird durch die Praxis bestätigt. Im Labor und bei scharf kontrollierten Baustellen wurde verschiedentlich [1, 4, 6] eine annähernd lineare Abhängigkeit $s/\bar{x}$ beobachtet. Auch die Vermutung, daß bei sorgloser Arbeit die Standardabweichung mit höherem $\bar{x}$ abnimmt, wird durch Bild 1 eher bestätigt als widerlegt.

Mit der nachstehenden Tabelle wird versucht, die statistisch belegten Erkenntnisse für eine Abschätzung der bei verschieden gearteten Baustellen zu erwartenden s-Werte zu verwenden.

Baustelle	klein	mittlere Größe	Großbaustelle
Zahl der Betonproben	keine	3 - 1o	3o und mehr
Zumessung	nach Volumen	nach Volumen oder Gewicht	nach Gewicht
Überwachung	durch Polier	durch Polier	durch Betoningenieur
sehr gut	5o	4o	3o
gut	6o	5o	4o
annehmbar	8o	65	5o
nachlässig	9o	8o	7o

Tabelle III: Geschätzte Standardabweichung in kp/cm^2

Diese Werte sollen dazu dienen, das Vorhaltemaß zu bestimmen, um das die mittlere Festigkeit höher liegen muß als die charakteristische Festigkeit oder Nennfestigkeit $ß_k$, welche heute in den meisten Bestimmungen als untere Festigkeitsgrenze definiert wird.

$$\bar{ß} = ß_k + \lambda \cdot s \qquad (4)$$

Wählt man die 5 % Fraktile, wie das CEB vorschlägt [5], beträgt der den statistischen Handbüchern zu entnehmende Beiwert $\lambda = 1,65$.

6. Der Unterschied zwischen der an Proben bestimmten Festigkeit und der Bauwerksfestigkeit

Die Mischungsstreuung (Gruppen 1 und 2 von Tabelle I) wird sich auf die Bauwerksfestigkeit sicherlich ähnlich auswirken wie auf die Betonproben. Dagegen muß man annehmen, daß die mit der Prüfung verbundene Streuung (Gruppe 6) bei am Bauwerk genommenen Proben eher größer wird. Insgesamt bestätigt die Erfahrung, daß die zufällige Streuung der Bauwerksfestigkeit mit den dem Frischbeton entnommenen Proben zutreffend erfaßt wird. Erheblich verändert laufen aber im Bauwerk die in den Gruppen 3 und 4 behandelten Einflüsse der Verdichtung und Nachbehandlung ab. Leider liegen bisher nur wenige Untersuchungen zu der Frage vor, wie sich die Bauwerksfestigkeit unter diesen vorwiegend als systematisch zu bezeichnenden Einflüssen verändert. An Hand von [7] lassen sich aber folgende generelle Feststellungen treffen:

- Bei großen Abmessungen und nicht zu dichter Armierung wird der Bauwerksbeton eher besser verdichtet sein als der Beton der Proben. Das Umgekehrte gilt für filigrane, stark bewehrte Bauteile.
- Beim Verdichten des Betons steigt überschüssiges Wasser nach oben. Die Folge ist ein Festigkeitsabfall in der obersten Schicht, die bei Balken vielleicht nur wenige Zentimeter, bei Säulen und Wänden aber bis zu 7o cm dick ist. Dieser Festigkeitsabfall liegt im allgemeinen in der Größenordnung von etwa 2o %.
- Ein ungenügender Schutz des frischen Betons gegen vorzeitiges Austrocknen kann vor allem bei feingliedrigen Bauteilen zu einem erheblichen und bleibenden Festigkeitsabfall führen.
- Von geringerem Interesse ist die verzögerte Festigkeitsentwicklung des bei niedrigen Temperaturen erhärtenden Betons. Im allgemeinen genügt es, diesen Einfluß mit den Formeln von Saul und Nurse zu verfolgen.

7. Größe und Streuung der Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit hängt in stärkerem Maße von der Probenform ab als die Druckfestigkeit. Zu den in Tabelle I schon aufgezählten Einflüssen kommt noch eine spürbare Abhängigkeit von der Art der Beanspruchung (zentrisch oder exzentrisch), von der Bindung am Zuschlagstoff und von den beim Austrocknen entstehenden Eigenspannungen.

Prüft man die Zugfestigkeit an gleichartigen Proben aus der gleichen Mischung, beobachtet man eine größere Prüfstreuung als bei der Druckfestigkeit. Sie liegt etwa bei s_p = o, o8 bis o, 12 $\bar{x}$.

Beim Versuch, die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit darzustellen, muß man aus den vorgenannten Gründen erhebliche Streuungen in Kauf nehmen und zwar selbst dann, wenn man sich auf ausgewählte Prüfverfahren und übliche Prüfkörperformen beschränkt. Man geht dabei am besten von folgender Formel aus

$$ß_z = c \cdot ß_w^{2/3} \cdot \left[kp/cm^2\right]^{1/3} \qquad (5)$$

Die nachstehende Tafel IV, die auf [8] beruht, zeigt die Veränderlichkeit der c-Werte und die zugeordneten Variationskoeffizienten. In ihnen ist der obengenannte Anteil der Prüfstreuung schon enthalten.

Prüfverfahren	Beiwert c $\left[kp/cm^2\right]^{1/3}$	Variationskoeffizient von c %
	o, 52	19
	o, 59	11
	1, o7	12
	o, 98	14

Tafel IV: Zusammenhang zwischen der Zug- und Druckfestigkeit von Standardproben

8. Größe und Streuung des Elastizitätsmoduls

Die Größe des E-Moduls hängt von den Verformungseigenschaften der beiden Komponenten Zementstein und Zuschlagstoff ab [9] . Da aber bei der Druckfestigkeit der Einfluß des Zementsteins viel größer ist als beim E-Modul, ist der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und E-Modul nicht sehr straff.

Eine statistische Auswertung [1o] der in [11, 12] zusammengestellten Versuchsergebnisse lieferte:

$$E_b = 625o \cdot \beta_w^{2/3} \cdot \left[kp/cm^2 \right]^{1/3} \qquad (6)$$

Die Streuungsanalyse lieferte V = 12 %.

9. Das Schwinden und Kriechen

Es ist bisher noch nicht gelungen, die das Schwinden und Kriechen des Betons auslösenden physikalischen Vorgänge eindeutig zu definieren. Der vom CEB 5 aufgrund einer Auswertung aller Versuchsdaten vorgelegte Vorschlag zur Abschätzung des Schwindmaßes ϵ_s und der Kriechzahl φ berücksichtigt folgende Einflüsse:

die relative Luftfeuchte der Umgebung
das Belastungsalter
die Zusammensetzung der Mischung
die Querschnittsabmessungen
die Belastungsdauer

Eine Streuungsanalyse zeigte, daß die mit den CEB-Empfehlungen abgeschätzten Werte mit folgenden Standardabweichungen behaftet sind:

beim Schwinden $s_{\epsilon s} = 1o \cdot 1o^{-5}$

beim Kriechen $s_{\varphi} = o,4$

Schrifttum

1 Cook, H. K.: "Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete" ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Detroit 1967

2 Erntroy, H. C.: "The Variation of Works Test Cubes" Research Report No 1o, Cement and Concrete Association, London 196o

3 Teychenné, D. C.: "The Variability of the Strength of Concrete and its Treatment in Codes of Practice" Structural Concrete, Vol. 3, No. 1, Journal of the Reinforced Concrete Association, London 1966

4 Rüsch, H., Sell, R., Rackwitz, R. "Statistische Analyse der Betonfestigkeit" Heft 2o6 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Ernst u. Sohn, Berlin 1969

5 Comité Européen du Béton: "Recommendations pratiques unifiées pour le calcul et l' exécution des ouvrages en béton armé" Comité Européen du Béton, Madrid 1964

6 Neville, A.M.: "The Relation between Standard Deviation and Mean Strength of Concrete Test Cubes" Magazine of Concrete Research, Vol. 11, No. 32, Cement and Concrete Association, London 1959

7 Petersons, N.: "Should Standard Cube Test Specimens be Replaced by Test Specimens Taken from Structures" Publication of Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1968

8 Heilmann, H.G.: "Beziehung zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit des Betons" "beton", Heft 2, 1969, Betonverlag Düsseldorf

9 Hansen, T.C.: "Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste" Journal of the American Concrete Institute, Volume 62, Detroit, Febr. 1965

1o Rackwitz, R.: "Die Streuung des Elastizitätsmoduls des Betons" erscheint demnächst

11 Roš, M.: "Die materialtechnischen Grundlagen und Probleme des Eisenbetons im Hinblick auf die zukünftige Gestaltung der Stahlbetonbauweise" Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Bericht Nr. 162, Zürich 195o

12 Beeby, A.W.: "Short-Term Deformations of Reinforced Concrete Members" Technical Report TRA 4o8, Cement and Concrete Association, London 1968

Bezeichnungen

x	Merkmal, z.B. Festigkeit, E-Modul usw.
$\bar{x}$	Mittelwert des Merkmales
s	Standardabweichung
s_p	Anteil des Prüfverfahrens an der Standardabweichung
$s_{\epsilon s}$	Standardabweichung des Schwindmaßes
s_φ	Standardabweichung der Kriechzahl
s_m	Anteil der Mischungszusammensetzung an s
V	Variationskoeffizient $V = s/\bar{x}$
$ß$	Festigkeit
$ß_w$, $ß_{2o}$	Würfelfestigkeit bzw. Festigkeit des 2o cm Würfel
$\bar{ß}_w$	mittlere Würfelfestigkeit einer Baustelle
$\bar{\bar{ß}}_w$	Mittelwert der $\bar{ß}_w$ gleichgearteter Baustellen
$ß_k$	charakteristische oder Nennfestigkeit
$ß_z$	Zugfestigkeit
E_b	Elastizitätsmodul
ϵ_s	Schwindmaß
φ	Kriechzahl

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird die Streuung der wesentlichsten Eigenschaften des Schwerbetons auf der Grundlage der Gauss'schen Normalverteilung untersucht, welche das Verteilungsgesetz der Festigkeits- und Verformungskennzahlen befriedigend genau wiedergibt. Nach einer Analyse der einzelnen Streueinflüsse wird für Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul, Kriechzahl und Schwindmass des Betons nach Gesetzmässigkeiten gesucht, welche die Grösse der Standardabweichungen bzw. des Variationskoeffizienten beschreiben. Es werden auch die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Werkstoffeigenschaften besprochen.

SUMMARY

The paper deals with the variability of some properties of normal concrete, assuming a Gaussian distribution, which seems to be a satisfying basis for such a study. After analysing the different influences producing dispersions an effort is made to determine the relationships describing the standard deviation or the coefficient of variation for the cube strength, tensile strength, Young's modulus, creep and shrinkage. In addition the interdependence of these properties of concrete is described.

RÉSUMÉ

La dispersion des qualités principales du béton lourd est examinée à la base de la distribution normale de Gauss qui reproduit avec une précision satisfaisante la loi de distribution des valeurs caractéristiques pour la résistance et la déformation. Après avoir analysé les différentes influences sur la dispersion, on cherche la relation déterminant les valeurs de l'écart quadratique moyen ou coefficient de variation de la distribution de la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module d'élasticité, le retrait et le fluage. L'interdépendance entre les différents propriétés du béton est également démontrée.

Leere Seite
Blank page
Page vide

Inventaire des causes possibles de dispersions des caractéristiques exigées pour les produits sidérurgiques prêts à l'emploi

Bestandesaufnahme der möglichen Streuungsursachen bei geforderten Eigenschaften für verkaufsfertige Stahlprodukte

Inventory of the possible causes for variations of the specified characteristics of finished steel products

JACQUES LECLERC
Président de la Commission des Etudes de Sidérurgie Lourde
(Association Technique de la Sidérurgie Française)
Directeur Métallurgique de la Société USINOR

I - INTRODUCTION :

Le Thème du Colloque visant à une meilleure définition de la sécurité des constructions, ma contribution en tant que Sidérurgiste consistera à procéder à un inventaire des causes possibles de dispersions des caractéristiques exigées pour les produits métallurgiques prêts à l'emploi .

Je ferai sans doute appel à des résultats relatifs à la dispersion des caractéristiques, mais plutôt que d'étudier les caractères aléatoires des caractéristiques, produit par produit, je ferai état des difficultés des sidérurgistes à réduire les dispersions, à placer les moyennes par rapport à des bornes imposées et essaierai de donner un aperçu des recettes dont ils disposent pour satisfaire à diverses exigences .

Je présenterai donc le Sidérurgiste plus comme un sorcier disposant d'un certain "pouvoir" sur les matériaux qu'il contrôle en fonction de règles de l'art, que comme un mathématicien raisonnant sur des populations normales. A cet égard notre sorcier est, malgré tout, un statisticien observant les caractéristiques en moyenne et étendue, se doublant d'un physicien cherchant en permanence à réduire les dispersions, puis à positionner la moyenne par rapport aux exigences des spécifications, donc des ouvrages .

Il n'y a pas simple empirisme dans son action et le fruit de l'expérience a, dans le domaine sidérurgique, valeur scientifique .

II - PRODUITS EXAMINES :

Je choisirai des exemples relatifs à trois catégories de produits :

- Les Tôles fortes pour constructions soudées et plus spécialement les aciers du type A 52 avec caractéristiques de résilience à basse température généralement livrés en aciers calmés normalisés, mais dont certaines des caractéristiques pourraient être assurées, comme c'est le cas pour les gros tubes soudés de même catégorie, en aciers semi-calmés, avec laminage contrôlé.

- Les Ronds à béton à haute limite d'élasticité de la classe E 40 et plus spécialement ceux obtenus par écrouissage à partir d'aciers doux .

- Les Aciers pour précontrainte pour lesquels les exigences d'aspect impliquent des précautions plus particulières au cours de l'élaboration et de la transformation .

III - IMPORTANCE du LINGOT d'ACIER UNITE de PRODUCTION :

Mais quelque soit le produit, l'unité de production à considérer avant de parler de dispersions est le lingot d'acier issu d'une coulée donnée :

Procédé d'élaboration , mode de désoxydation, coulée en lingotière sont des éléments importants à ce stade et pendant longtemps le procédé d'élaboration est apparu comme caractère dominant d'une production et les spécifications de matériaux y donnent encore souvent référence.

En France, cette notion est désormais absente des spécifications pour les aciers de construction, liberté étant ainsi donnée au Sidérurgiste pour assurer par le procédé de son choix (avec procédure d'homologation préalable éventuelle) les caractéristiques d'emploi exigées.

Ceci résulte en fait de ce que Aciers Martin, Aciers à l'Oxygène , Aciers électriques, Aciers Thomas, sont désormais maitrisés par notre sorcier qui, en dispersion et moyenne, contrôle au terme de l'élaboration la composition chimique au-delà des éléments classiques C , Mn , S , P .

Ces procédés différaient effectivement entre eux et étaient à traiter par familles lorsque l'on ne connaissait pas l'influence de l'azote, des impuretés métalliques, de l'Oxygène, de l'Hydrogène, etc. Mais dès lors que ces éléments de la composition chimique sont contrôlables et ajustables à la demande, les caractéristiques mécaniques qui en dépendent sont, toutes choses égales par ailleurs, également contrôlées.

Toutes choses égales par ailleurs, nous pensons au stade métal liquide, essentiellement "état d'oxydation", qui conditionne grandement la cinétique de solidification du lingot d'acier, si l'on intègre dans ce terme :

- processus thermique de la solidification ,
- formation et développement de la structure primaire du lingot d'acier ,
- importance des phénomènes de liquation et de ségrégation .

IV - QUE VOIT-ON sur une COUPE de LINGOT :

La coupe d'un lingot effervescent normal révèle l'existence de soufflures liées au mécanisme de développement aux divers niveaux de la réaction C + O = CO .

Un acier effervescent est un acier au sein duquel la réaction se produit dans le sens de la disparition des éléments C et Oxygène , le produit C x O = K dépendant de la pression partielle de CO et de la température .

Les conditions de température et de pression variant à l'intérieur du lingot au cours de la solidification, l'effervescence s'arrête lorsque les bulles de CO ne peuvent plus se former ou remonter pour un dégagement à l'air libre .

Bloquer l'effervescence consiste à empêcher la réaction et à arrêter le dégagement de CO , soit par additions en lingotière (aciers bloqués chimiquement) soit par modification des conditions de pression (aciers bloqués mécaniquement) .

Calmer l'acier consiste à le désoxyder au moyen d'éléments plus avides d'Oxygène que le Carbone (Mn , Si , Al) ajoutés suffisamment tôt, donc généralement avant la coulée en lingotière et en quantité suffisante pour que le dégagement CO ne se produise nulle part .

Stabiliser consiste à calmer en lingotière un acier dont l'effervescence initiale peut avoir été favorisée pour obtenir une peau d'acier effervescent

Les aciers semi-calmés ne sont pas complètement calmés mais ne sont pratiquement pas effervescents .

La figure 1 donne une idée des divers types de lingots ainsi schématiquement décrits

Pour les aciers effervescents le volume des soufflures compense la contraction qui devrait s'exercer entre l'état liquide (densité 7)et l'état solide (d = 7,86) mais pour un acier calmé cette contraction, qui n'est pas terminée après fermeture de la tête (si elle est prématurée), entrainerait au terme de la solidification l'apparition d'un creux axial, d'où l'intérêt du masselottage localisant ce creux en tête du lingot (partie éliminée au cours des opérations ultérieures de laminage) .

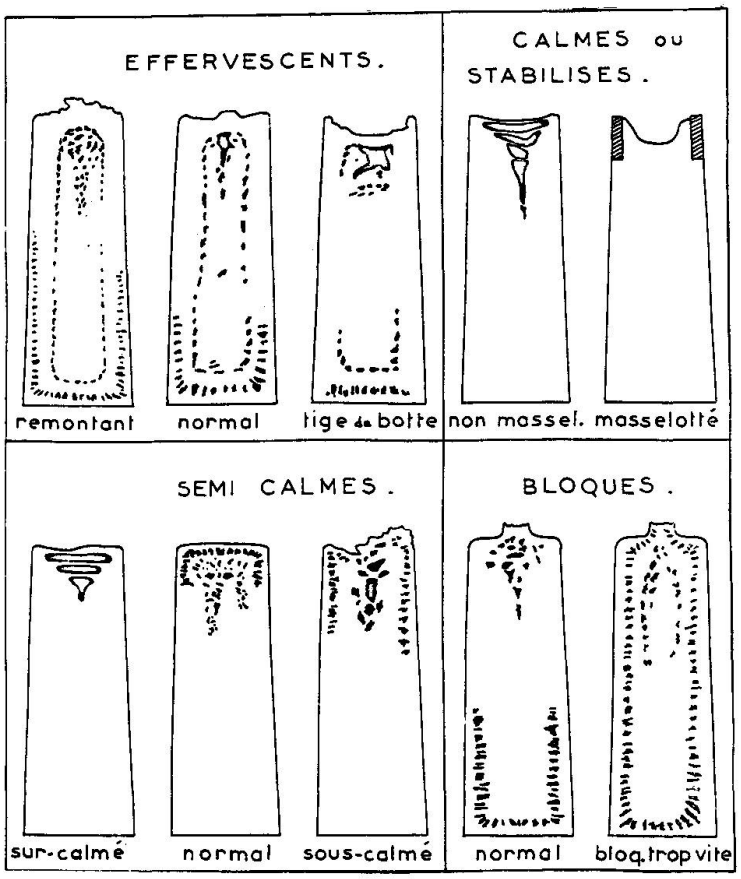


Figure 1

V - COUPE d'un LINGOT d'ACIER EFFERVESCENT :

Les longues soufflures de pied ou soufflures primaires se développent sous la peau du lingot qui en est exempte du fait du rapide refroidissement au contact de la lingotière; mais, après cette solidification rapide, le front de solidification avance plus vite que ne s'échappent au travers du métal encore liquide, entre les axes de solidification , les bulles de CO .

Les soufflures secondaires que l'on observe à la limite du lard du lingot et du noyau, semblent d'une manière imagée, avoir choisi de grimper le long du front de solidification qui les rattrapait et, en fait, on observe bien, qu'elles se pressent en filets et chapelets dans la zone de tête qu'elles cherchent à atteindre et où la pression est plus faible .

Enfin, les grosses soufflures de tête ont gonflé jusqu'à vouloir crever la surface et n'ont en fait réussi qu'à développer un champignon spongieux qui les a enfermées .

Les soufflures primaires et secondaires se ressoudent au laminage car elles sont exemptes d'inclusions nuisant à la compacité du produit fini .

VI - SOLIDIFICATION DENDRITIQUE - LIQUATION :

Sans entrer dans le détail du diagramme fer-carbone, disons que si nous isolons la partie supérieure relative à la solidification, on constate que l'on passe de l'état liquide à l'état solide en traversant un domaine où existent simultanément les phases liquide et solide. Ce domaine est limité supérieurement par le liquidus , inférieurement par le solidus .

Quant au refroidissement (figure 2) , on atteint le liquidus en L , les premiers cristaux se solidifiant ont pour composition celle correspondant à l'intersection S de la courbe solidus avec l'horizontale passant par L. A une température inférieure figurée par l'horizontale T A B C coupant en A le solidus, en C le liquidus on a pour une concentration correspondant à la verticale de B égalité des deux produits:AB x poids des cristaux solides = BC x poids encore liquide .

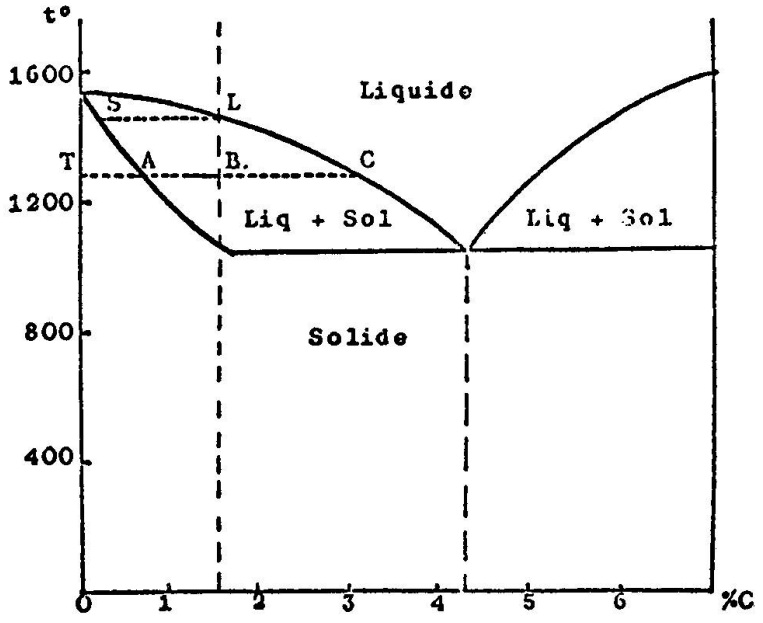


Figure 2

La composition de la phase solide comme de la phase liquide évolue au cours de la solidification, de telle façon que la composition moyenne reste constante. On voit que la solidification commence par le

dépôt de cristaux peu carburés et que le liquide s'enrichit en Carbone . C'est le phénomène de liquation du Carbone que nous avons signalé et pris en considération dans le paragraphe relatif à l'effervescence . Il y a de la même façon,pour les derniers cristaux solidifiés, enrichissement de ceux-ci en Soufre, Phosphore, etc..

Si nous coupons longitudinalement un lingot de métal calmé, nous observons (figures 3 et 4) :

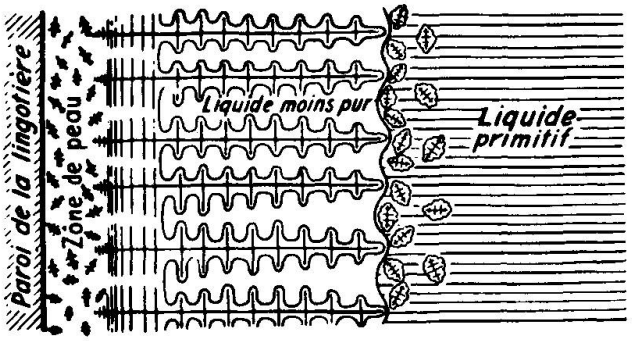
a) Une zone de peau d'épaisseur extrêmement faible mais fonction de la vitesse de coulée, la température de coulée, la température de la lingotière, la taille du lingot, etc.. Cette zone est formée de petits cristaux ayant la composition du métal liquide parce qu'obtenus par solidification rapide ;

b) Une zone de cristallisation basaltique formée de cristaux se développant suivant des axes cristallins préférentiels à partir de la paroi déjà solidifiée où se trouvent les germes initiaux de cristallisation . Le développement se fait , en arborescences dendritiques suivant des axes cristallins préférentiels perpendiculaires entre eux (lié au mode de cristallisation cubique du fer), mais autour d'un tronc perpendiculaire aux parois (progression frontale de la solidification) ;

Zone de peau (composition du métal liquide)

Cristallisation équiaxe

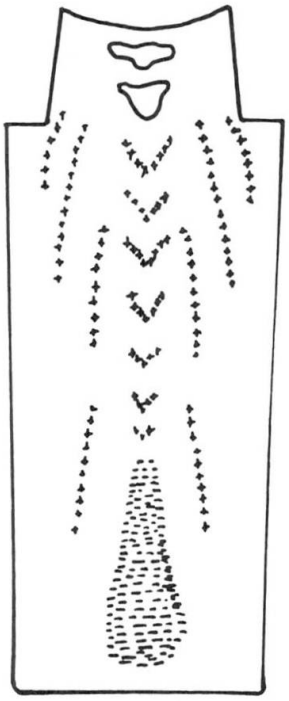
Cristallisation basaltique



Développement de la solidification transversale

Figure 3

c) Une zone de cristallisation équiaxe : Les axes des dendrites sont formés de cristaux plus purs que le liquide restant qui s'enrichit en C, Mn, S, P . Devant le front de solidification se crée une zone impure au sein de laquelle le refroidissement devenant moins rapide,se développent des germes de cristallisation en très grand nombre et à partir desquels des cristallites ou dendrites se développent sans orientation préférentielle.On dit qu'il y a cristallisation équiaxe. La limite entre la zone basaltique et la zone équiaxe étant nette,on peut imaginer que la cristallisation équiaxe succède à la cristallisation basaltique dès lors qu'il y a changement brusque dans les échanges thermiques (consécutivement à la contraction de la zone de peau qui quitte le contact d'avec la lingotière) ;



Ségrégations dues à la progression verticale de la solidification

Figure 4

d) Une zone de pied : Dans le sens vertical, la solidification progresse à partir de la base comme à partir des parois mais, en outre, tandis que progresse le front de solidification, des germes (inclusions solides) permettent, au sein du liquide, la formation de cristaux qui, plus lourds que le liquide, vont se déposer sur le fond solidifié du lingot. La formation de ces cristaux (pauvres en Carbone) ayant entrainé vers le bas les inclusions qui leur ont servi de germes explique ce que l'on appelle la ségrégation inverse ainsi que la densité plus forte d'inclusions de silicates, en particulier dans cette même zone ;

e) Une progression de la solidification vers la tête : La partie centrale s'enrichissant en Carbone , la température du liquidus s'abaisse et la solidification progresse dans le sens vertical . Tout se passe comme si la solidification ralentissait en tête (aidée en cela par le masselottage) et s'accélérait en pied .

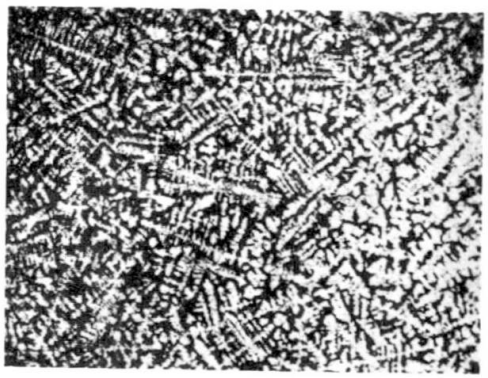


Figure 5

Il convient de noter que l'interpénétration dendritique détermine la maille primaire de l'acier (figure 5)

Au cours des transformations à chaud du métal, l'édifice initial est brisé et modifié dans le domaine solide, le grain est affiné,mais les hétérogénéités structurales initiales subsistent,atténuées en partie par le corroyage dont le but essentiel est d'homogénéiser les caractéristiques dans les directions d'utilisation

REMARQUE : Quand on parle d'acier à grain fin,on s'intéresse soit à la taille du grain austénitique, soit à la taille du grain ferritique, mais il s'agit, en fait, de sous-mailles du grain primaire et dès l'élaboration,par des additions appropriées ayant une incidence sur le processus de solidification, l'obtention d'une maille interdendritique fine est déjà une condition favorable préalable à l'obtention du grain micrographique fin .

VII - MACROGRAPHIE SEGREGATIONS :

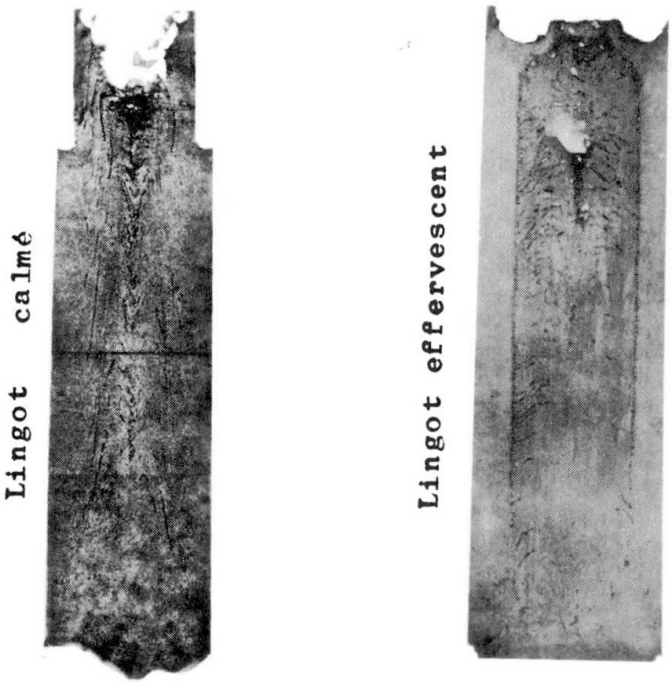


Figure 6

La figure 6 donne une image de l'empreinte photographique après attaque au réactif BAUMANN de deux lingots d'aciers : l'un effervescent , l'autre calmé .

Les filets de ségrégation apparaissent au droit des zones dans lesquelles se sont concentrés les éléments ségrégés (Soufre , Phosphore , Carbone)

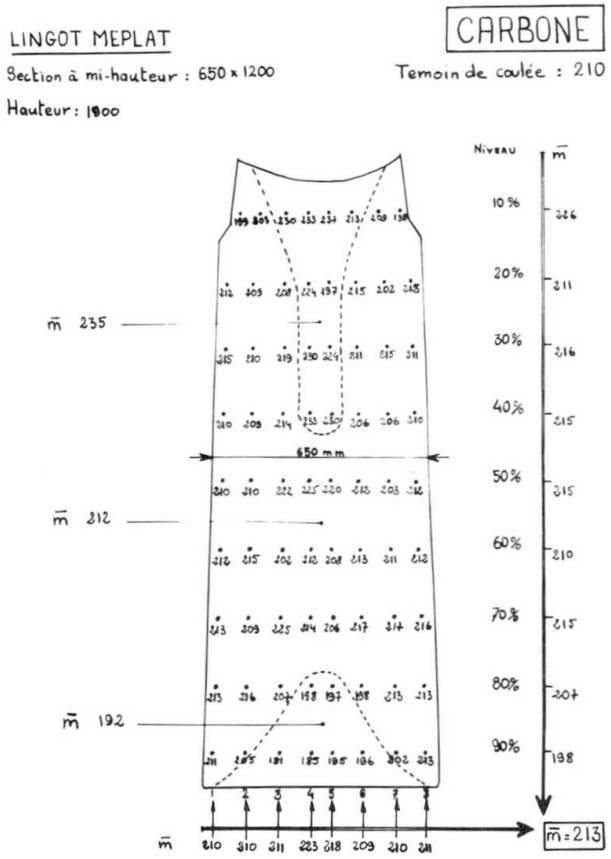


Figure 7

La figure 7 donne une idée des écarts de teneurs en Carbone sur coupe verticale d'un lingot d'acier calmé de 11 T. de section moyenne 650 x 1200, hauteur 1900 .

La composition du lingotin de coulée était la suivante :

C	Si	Mn	S
0,210	0,325	1,200	0,017

P
0,020

(Acier de la classe A 52 soudable)

Les figures 8 et 9 sont relatives à la ségrégation verticale et à la ségrégation transversale pour l'élément Carbone .

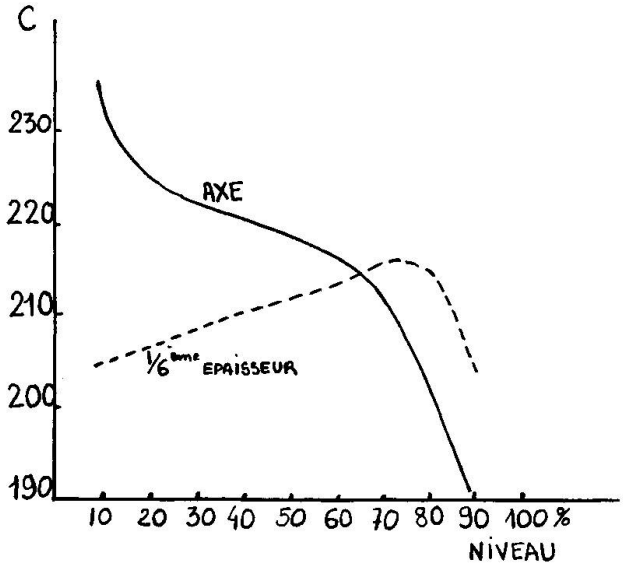


Figure 8

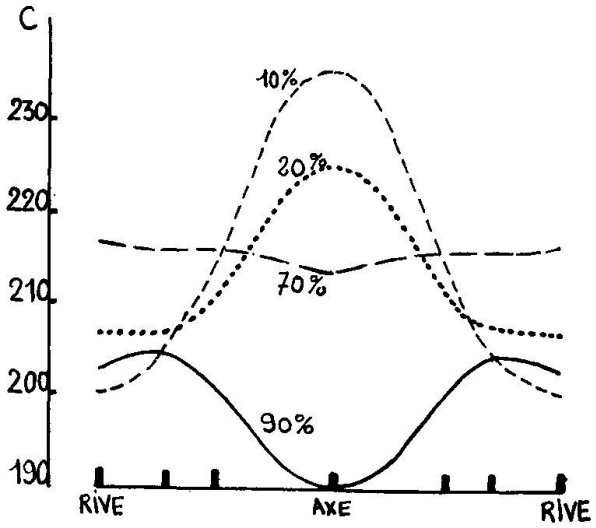


Figure 9

On constate qu'à la verticale du tiers extérieur de la demi coupe, on retrouve en moyenne la teneur de classement . Cette même teneur se retrouve au niveau horizontal 70 % à partir de la tête.

Nous avons délimité la zone de tête segrégée pour laquelle le Carbone moyen est de 0,235 contre 0,213 pour l'ensemble des points de prélèvement (72 points) 0,192 en pied dans la zone pure également délimitée, 0,212 pour les points en dehors de ces deux zones.

On serait conduit à des observations analogues pour les autres éléments . Ainsi sur le même lingot, on note(en millièmes %)

	Classement	Moyenne	Poche de T	Poche de P	Reste du lingot	Etendue
Mn	1200	1200	1225	1165	1205	1160/1280
Si	325	326	335	315	328	310/ 351
S	17	17	20	15	17	15/ 25
P	20	20	23	18,5	19,5	18/ 27

VIII - DISPERSION des CARACTERISTIQUES dans une MEME TOLE :

Pour 2 tôles : A) 30 x 2900 x 6250 B) 30 x 1450 x 24710 issues de deux coulées différentes, nous citerons quelques résultats extraits d'une étude sur la dispersion des caractéristiques E - R - A% - Kv .

Il s'agit de tôles issues du corps de lingot ayant donné lieu à des prélèvements en 15 positions différentes :

(rive gauche , 1/4 largeur gauche , axe , 1/4 largeur droite , rive droite) ; (milieu travers et aux deux extrêmités).

En chaque position il a été prélevé 7 essais de traction (long et travers) . 5 résiliences Kv long à peau cassées à - 20°C et 5 cassées à 0°

(Il s'agit d'acier A 52 soudable avec garantie Kv long 5 Kgm/cm2 à - 20°C).

- Analyse de coulée :

	C	Si	Mn	S	P	Al sol.
A -	0,175	0,390	1,440	0,023	0,025	0,031
B -	0,215	0,275	1,430	0,014	0,040	0,007

- Analyse sur tôles (15 prélèvements de part en part)

	A		B	
	moyenne	étendue	moyenne	étendue
C	0,180	0,175/0,184	0,232	0,221/0,239
Si	0,364	0,345/0,387	0,280	0,253/0,310
Mn	1,424	1,400/1,450	1,424	1,405/1,445
S	0,019	0,017/0,021	0,012	0,011/0,013
P	0,024	0,023/0,025	0,039	0,036/0,041

- Essais de Traction :

1 - Dispersion due à l'essai (7 éprouvettes prises côteà côte)

		Ecart-type		
		Sens long	Sens travers	Ensemble
Résistance Kg/mm2	A	0,31	0,18	0,25
	B	0,34	0,24	0,29
Limite élastique Kg/mm2	A	0,62	0,67	0,65
	B	0,65	0,57	0,61
Allongement %	A	1,07	1,46	1,28
	B	1,58	1,74	1,66

2 - Ensemble de la tôle

			Axe		1/4 Largeur	
			Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Résistance (Kg/mm2)						
	A	Long	55,8	0,81	55,7	0,72
		Travers	55,7	0,80	55,8	0,58
	B	Long	60,0	0,78	59,6	0,39
		Travers	60,1	0,77	59,6	0,55
Limite Elastique (Kg/mm2)						
	A	Long	38,6	1,26	37,9	0,89
		Travers	38,5	1,25	38,5	0,97
	B	Long	42,8	0,90	42,5	0,83
		Travers	43,0	0,98	42,7	1,03
Allongement (5,65)						
	A	Long	32,1	1,16	31,9	1,00
		Travers	28,1	1,85	27,3	1,23
	B	Long	29,4	1,69	29,6	0,88
		Travers	27,2	1,95	26,9	1,84

3 - Ségrégation longitudinale

			Valeur moyenne en	1ère extrêmité	Milieu	2ème extrêmité
Résistance	A	Long		56,5	55,7	55,0
		Travers		56,6	55,7	54,9
	B	Long		59,5	60,0	60,6
		Travers		59,5	60,1	60,9
Limite Elastique	A	Long		39,5	38,7	37,7
		Travers		39,6	38,1	37,7
	B	Long		42,3	42,8	43,2
		Travers		42,5	43,3	43,1
Allongement	A	Long		32,0	32,4	32,0
		Travers		28,0	28,0	28,4
	B	Long		31,3	29,7	29,2
		Travers		27,3	27,3	27,0

- Résiliences - Kv en Kgm/cm2

	Tôles	A	B
Kv long à 0°C	moyenne	13,07	15,83
	écart-type ensemble	0,81	1,07
	écart-type de l'essai	0,40	0,98
Kv long à - 20°C	moyenne	12,26	11,07
	écart-type ensemble	1,18	1,51
	écart-type de l'essai	1,07	1,40

IX - AUTRES EXEMPLES de DISPERSIONS dans les FABRICATIONS de TOLES FORTES :

Compte-tenu des résultats de diverses études sur plusieurs nuances, on peut retenir :

- Dispersion des essais
  - Les écarts-type en tête et pied sont du même ordre de grandeur
  - Ils diffèrent d'une nuance à l'autre , mais on constate toujours :

$$\sigma_R < \sigma_E < \sigma_A$$

  - A titre indicatif, on peut admettre :

σ_E de l'ordre de 0,7

σ_R " 0,35

σ_A " 1,4 $\qquad \sigma_R = \frac{\sigma_E}{2} = \frac{\sigma_A}{4}$

- Variations entre tête et pied (moyennes et dispersions sur les écarts) (sur un ensemble de 42 coulées)

Nuance	E		R		A		Nombre de coulées
	$\bar{m}$	σ	$\bar{m}$	σ	$\bar{m}$	σ	
Martin effervescent 37/44	+ 1,5	1,3	+ 2,2	1,5	- 2,1	2,5	6
Martin effervescent 42/50	+ 2,4	1,0	+ 4,6	0,9	- 2,7	2,3	4
Martin calmé A 42	+ 0,2	0,9	+ 0,6	0,8	- 0,8	1,9	18
Martin calmé A 52	+ 0,3	1,2	+ 1,5	1,0	- 1,0	1,9	14

- Variations à l'intérieur d'un lot (tôles issues d'une même coulée) .

Le tableau suivant donne pour le même ensemble qu'au tableau précédent les valeurs les plus probables de l'écart-type de chaque caractéristique E - R - A dans un lot

Nuance	E		R		A	
	T	P	T	P	T	P
Martin effervesc.t 37/44	1,02	0,75	1,74	0,95	1,40	1,54
Martin " 42/50	1,12	0,87	0,66	0,57	1,37	2,38
Martin calmé A 42	1,02	0,97	0,55	0,60	0,86	1,02
Martin calmé A 52	1,13	0,94	1,21	1,07	1,14	1,38

- Moyennes et dispersions par nuance (de coulée à coulée)

Nuance	E		R		A	
	T	P	T	P	T	P
Martin efferv.t 37/44	24,8 1,5	23,3 1,1	40,5 1,5	38,3 1,8	28,8 1,1	30,9 1,6
Martin efferv.t 42/50	23,9 0,9	21,5 0,9	42,8 1,6	38,2 0,9	27,0 1,0	29,7 1,7
Martin calmé A 42	28,2 1,6	28,0 1,4	43,8 1,5	43,2 1,7	30,1 1,5	30,9 1,5
Martin calmé A 52	38,5 1,8	38,2 1,7	56,2 2,3	54,7 2,1	24,9 1,6	25,9 1,7

X - UTILISATION de METHODES STATISTIQUES de RECEPTION pour les TOLES FORTES :

1ère Remarque :

Indépendamment de la nature du métal, les dispersions propres à l'essai sont loin d'être négligeables, les causes de ces variations pouvant provenir de :

- Différence de composition et de structure ,
- Fidélité de la machine d'essai,
- Dimensions des éprouvettes ,
- Erreurs de lecture ,
- Différents opérateurs , etc..

2ème Remarque :

A partir de résultats tels que ceux cités ci-dessus, on peut déterminer pour des lots dont on connait les résultats, tôle par tôle, la limite supérieure à admettre pour le coefficient k conduisant à acceptation ou rejet d'un lot par comparaison de $\overline{m} \pm k\sigma$ à des bornes supérieures ou inférieures d'acceptation .

Ainsi pour un ensemble de 15 coulées d'acier calmé A 42 comportant 12 coulées dont tous les essais E et R sont satisfaisants individuellement, la détermination de k conduit à choisir : $k < 2,20$ pour 12 coulées
$k < 1,00$ pour deux coulées trop douces
$k < 1,50$ pour une coulée dont seul un essai est trop faible (il s'agit de coulées testées sur 15 à 30 tôles) .

3ème Remarque :

Le calcul de $\overline{m}$ et de σ à partir d'essais provenant de tôles différentes et d'emplacements différents (Tête et pied par exemple) peut conduire en fait à juger statistiquement à partir d'éléments issus de deux familles différentes .

Soit , par exemple , deux familles (m_o, σ_o) (m_1, σ_1) avec $m_1 > m_o$ ayant donné lieu (pour simplifier) au même nombre de prélèvements d'où pour l'ensemble

$$M = \frac{m_o + m_1}{2} \qquad \Sigma^2 = \frac{\sigma_o^2 + \sigma_1^2}{2} + \frac{(m_1 - m_o)^2}{4}$$

Si l'on pose $\frac{\sigma_1}{\sigma_o} = \lambda$ en abscisse , $\frac{m_1 - m_o}{\sigma_o} = g$ en ordonnées

on peut découper le quadrant λ, g en quatre zones délimitées par une ellipse, une droite et une hyperbole (le cas traité correspond à $k = 2$ dans la formule $m - k\sigma$)

Intérieur de l'ellipse $m_o - 2\sigma_o < M - 2\Sigma < m_1 - 2\sigma_1$

Entre ellipse et droite $M - 2\Sigma < m_o - 2\sigma_o < m_1 - 2\sigma_1$

Entre droite et ellipse $M - 2\Sigma < m_1 - 2\sigma_1 < m_o - 2\sigma_o$

Intérieure à l'hyperbole $m_1 - 2\sigma_1 < M - 2\Sigma < m_o - 2\sigma_o$

équation de la droite $g = 2(\lambda - 1)$

équation de l'ellipse $\frac{3}{4} g^2 - 2g + 2(\lambda^2 - 1) = 0$

équation de l'hyperbole $\frac{3}{4} g^2 + 2g\lambda + 2(1 - \lambda^2) = 0$

Pour la comparaison à une valeur limite minimale, on voit ainsi que les 1ère et 4ème zones sont favorables au fournisseur, les 2ème et 3ème lui sont défavorables . (figure 10)

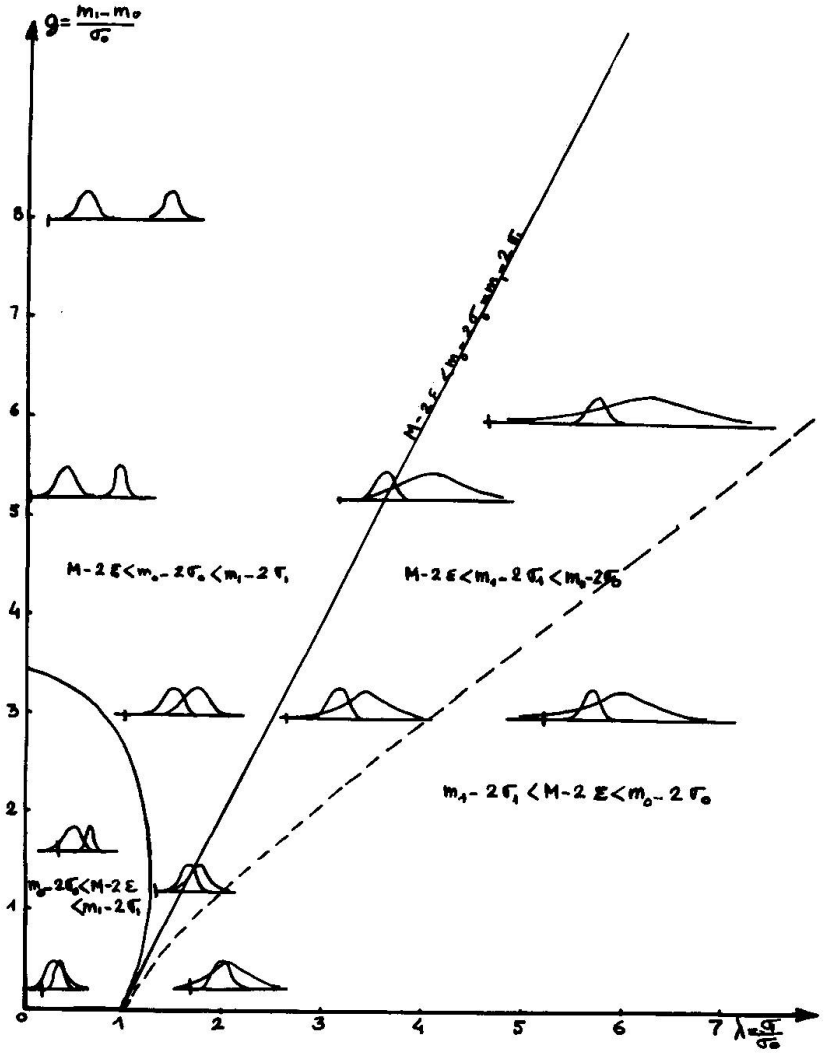


Figure 10

4ème Remarque :

Pour la réception de lots de tôles issus d'une même coulée, trois méthodes peuvent être utilisées (en matière de critères quantitatifs) :

- Méthode de réception avec contre-épreuve , tout essai jugé défectueux étant remplacé par deux nouveaux essais qui doivent être satisfaisants (nombre d'essais unitaires définis par lot) avec une loi d'échantillonnage fonction de la taille du lot .

- Méthode de réception, tôle par tôle, et comparaison des résultats individuels à des critères unitaires d'acceptation ou de rejet.

- Méthode de l'épreuve complémentaire avec interprétation statistique . Ayant par exemple prélevé cinq essais sur cinq tôles différentes, si l'un au moins est défectueux, on prélève un nouveau groupe de cinq essais et on compare $m \pm k\sigma$ (m et σ déduits de cet échantillonnage de dix essais avec élimination partielle tôlerie de certains d'entre eux pour tenir compte de la remarque précédente) aux limites inférieures ou supérieures à respecter.

On peut déterminer, à partir des courbes d'efficacité $P = (1 - p)^5$ et en fonction du risque fournisseur α de se voir refuser un lot constant p_1 de tôles mauvaises et du risque client β d'accepter une proportion p^2 de tôles mauvaises, une borne supérieure pour k à choisir dans la formule $\bar{m} - k\sigma$ (à supposer que α = 5 % et β = 10 % et que l'épreuve complémentaire soit une épreuve de rattrapage de même sévérité que l'épreuve initiale , on trouve k = 1,20) .

Pour des prélèvements de 7 essais, on trouverait pour le même couple (α = 5 β = 10) k = 1,39

Pour α 5 % β 5 % on trouverait pour 5 prélèvements k = 1,22 et pour 7 prélèvements k = 1,41 et il faudrait exécuter 23 prélèvements pour approcher k = 2 .

Le choix du coefficient 2 correspond donc à une réception par lot, sur prélèvement de 23 échantillons et rebut si un seul d'entre eux est mauvais .

Dans ces conditions, pour les tôles de qualité , il est généralement procédé à une réception, tôle par tôle ou par feuille mère laminée ; ainsi est d'ailleurs prise en considération l'influence importante du facteur épaisseur sur les caractéristiques traction des tôles fortes .

XI - RELATION entre CARACTERISTIQUES de TRACTION et COMPOSITION :

L'Aciériste, au vu de l'analyse d'une coulée déterminée, doit supputer, en fonction : des produits à réaliser, des conditions propres à une commande (formats) ou propres à une spécification, mais aussi en fonction des conditions de transformation (taille des lingots, processus de transformation) ses chances ou plutôt ses risques vis-à-vis des caractéristiques à réaliser . Il établit donc, entre caractéristiques et éléments de la composition, des formules de régression qu'il peut utiliser dans certaines limites .

Supposons, par exemple, la formule E = 23 + 25 C + 10 Mn valable pour des aciers calmés , normalisés, de la classe A 52 soudable, dans le domaine C = 0,150/0,220 - Mn = 1/1,500 - Si = 0,30 environ . Cette formule ne permet en fait de prévoir la limite d'élasticité E en travers qu'avec une précision de ± 3 si l'on tient compte du fait qu'elle a été établie en ne considérant que les seuls éléments Carbone et Manganèse , toutes épaisseurs de tôles étant confondues dans le domaine 10 à 40 mm. (La figure 11 donne une idée de la variation de E travers en fonction de l'épaisseur) .

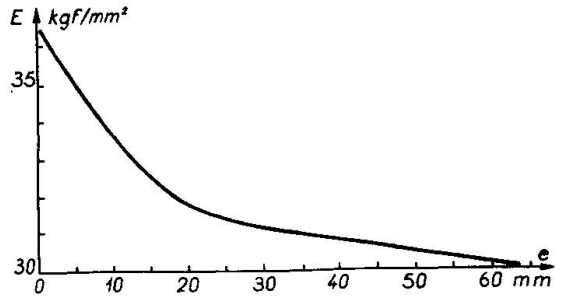


Figure 11

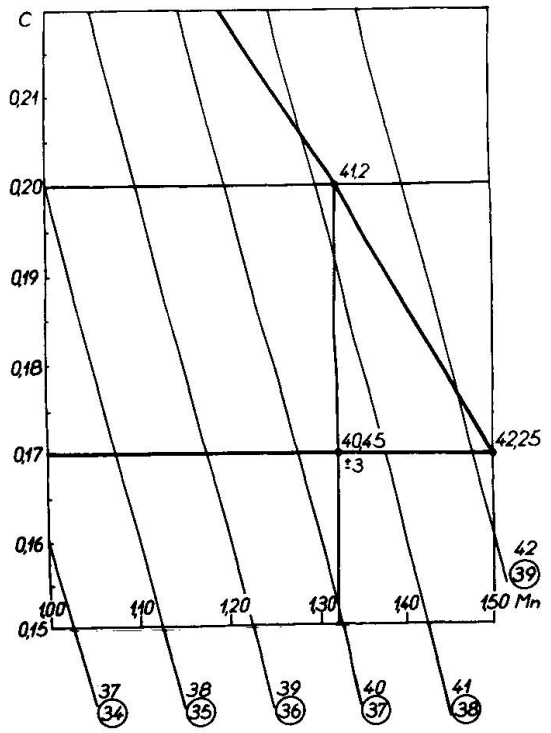


Figure 12

Dès lors , dans le plan C - Mn (figure 12), on peut tracer des droites d'égale limite d'élasticité probable; nous avons indiqué en chiffres entourés ○ les minis que l'on peut garantir sur une même droite "d'iso-élasticité"

Si nous portons dans le même système de coordonnées (C Mn) la clause $C + \frac{Mn}{6} = 0,42$, limite souvent choisie en fonction d'exigences de soudabilité, on constate que l'Aciériste voulant par exemple réaliser E > 36 ne disposerait, dans le domaine initial C : 0,15/0,22 - Mn 1,0/1,50, que des fourchettes réduites :

pour C	0,17	Mn	1,345/1,500
C	0,20	Mn	1,100/1,320
C	0,22	Mn	1,050/1,200

ce qui conduit en fait à viser C : 0,18/0,20 Mn : 1,200/1,300 carbone et manganèse étant souvent hauts et bas simultanément .

XII - UTILISATION d'ELEMENTS d'ADDITION :

Pour réaliser des limites d'élasticité supérieures à 36 Kg/mm^2 sur tôles fortes normalisées, on utilise, dès lors que les teneurs en Carbone sont limitées en fonction d'exigences particulières pour la soudabilité, des additions telles que Niobium, Vanadium, Nickel , Molybdène, (parfois Cuivre ou Phosphore Cuivre : cas des aciers patinables utilisés à l'état non peint) parfois, outre les éléments fixateurs d'azote (Nb - V), une renitruration de l'acier.

Dans le domaine des limites d'élasticité comprises entre 36 et 50 Kg/mm2 , on utilise ces éléments dans les limites suivantes :

Nb	0,030/0,050
V	0,030/0,120
Ni	0,30/0,70
Mo	0,12/0,25
N	0,015 environ

La figure 13 donne, sous forme de tableau , une idée des choix actuellement possibles dans la gamme (E 33 à 45 Kgf/mm2 - R 40/48 à 60/70) pour les aciers de construction soudables en épaisseurs inférieures à 25 mm.

E normalisé (ép. < 25 mm) Eléments retenus	25	28	30	33	36	38	40	43	45
C - Mn	X	X	X	X	X				
Nb					X	X			
Nb - V					X	X			
V					X	X	X		
Ni - Nb							X		
Ni - V							X		
Ni - Nb - V								X	X
R état normalisé (e < 25 mm)	40/48	42/50	44/52	48/56	52/62	54/64	58/66	58/66	60/70

Figure 13

La figure 14 précise les conditions du choix si l'on veut faire intervenir des limitations de teneurs en Carbone à des niveaux inférieurs à 0,22 ou l'influence du traitement de détente après soudage sur les caractéristiques de l'acier de base

Caractéristiques désirées	Epais.	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R
Etat normalisé	< 25	33	48	36	52	38	54	40	58	43	58	45	60
	25/50	31-32	46	34	50	36	52	38	56	41	56	43	58
Etat relaxé	< 25	31-32	46	34	50	36	52	38	56	41	56	43	58
	25/50	30-31	45	32	48	35	50	37	54	39	54	41	56
C < 0,16		36 Nb		36 Nb V		38 V							
C < 0,18		36 C Mn		36 Nb		38 Nb V		40 Ni V		43 Ni Nb V			
C < 0,20		33 C Mn		36 C Mn		38 Nb		40 Ni Nb		43 Ni Nb V		45 Ni Nb V	
C < 0,22								40 V		43 Ni Nb V		45 Ni Nb V	

Figure 14

XIII - LA RESISTANCE à l'EFFET d'ENTAILLE, CRITERE de SELECTION à FINS MULTIPLES :

Résilience à l'ambiante ; Résilience à basse température ; Initiation ou propagation de rupture fragile ; Aspect de cassure à faciès ductile ou cristallin, etc.. Toutes ces données, faisant appel à des techniques variées d'appréciation de la fragilité sous l'effet d'un choc, ne sont que des données qualitatives permettant de repérer un niveau de qualité par un type d'essai donné . Les essais d'appréciation de la fragilité sous choc ne sont que des essais conventionnels . Sans doute permettent-ils une classification des aciers en groupes, mais il ne faut pas perdre de vue qu'ils ont également pour objet de renseigner l'utilisateur quant aux précautions à prendre à la mise en oeuvre en fonction du type d'application envisagée .

En particulier, dans le domaine de la construction soudée, dominé par le souci d'assurer "la continuité métallique", il faut prévenir :

- la formation de criques ou fissures ,
- la formation de constituants fragiles ,
- le développement de ruptures fragiles .

Ces trois préoccupations visent à mettre les constructions à l'abri des risques de ruptures s'initiant sur altérations locales ou opératoires et susceptibles de se propager localement ou globalement .

Lorsqu'une rupture se produit à partir de la zone soudée, elle quitte généralement cette zone et se propage au travers du métal de base . C'est donc essentiellement à l'arrêt de ruptures fragiles que l'on s'attache en imposant à l'acier de base des conditions de ductilité dont rend compte l'essai de résilience . Les niveaux imposés (niveaux d'énergie ou température d'essai) sont d'autant plus sévères que les constructions sont plus sollicitées).

La propagation de rupture se développe sur initiation locale, à partir des zones de contraintes élevées et il est logique d'être plus sévère pour les tôles mises en oeuvre dans les zones de contraintes élevées, comme il est normal d'exiger des niveaux d'énergie pour la résilience, plus élevés pour des aciers à plus haute limite d'élasticité.

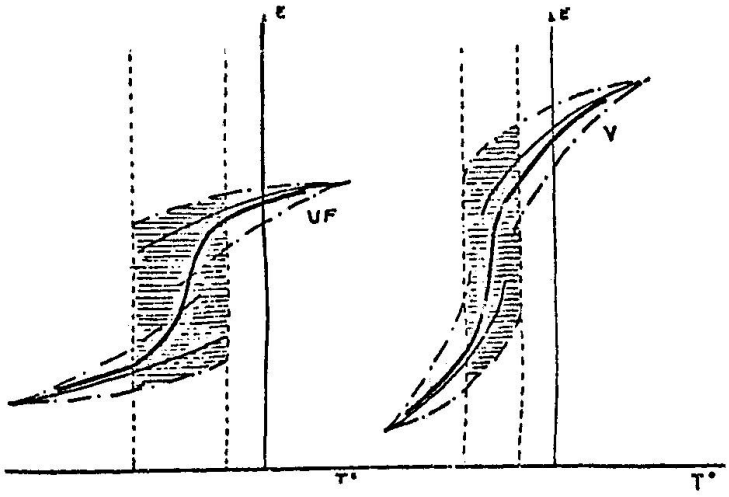


Figure 15

La figure 15 illustre les raisons du choix de l'entaille en V pour délimitation de la zone de transition lors de l'exécution d'essais de résilience à basse température, l'énergie de rupture s'abaissant plus fortement qu'avec entaille en U , avec l'abaissement de la température d'essai .

La courbe de transition de résilience renseigne l'utilisateur quant à la position dans le plan température/énergie de la zone de

bimodalité de rupture séparant le domaine des ruptures à faciès ductile des ruptures à faciès cristallin .

Le tracé de telles courbes est intéressant pour connaître une classe d'acier déterminée mais, pour des fabrications définies, il suffit dans la pratique de situer un acier à contrôler par rapport à un niveau de référence choisi, permettant de s'assurer que l'acier contrôlé est de la classe désirée. Les niveaux Kv long 3,5 Kgm/cm2 ou 5 Kgm/cm2 à 0°C ou - 20° sont généralement choisis comme niveaux repères des différentes classes usuelles

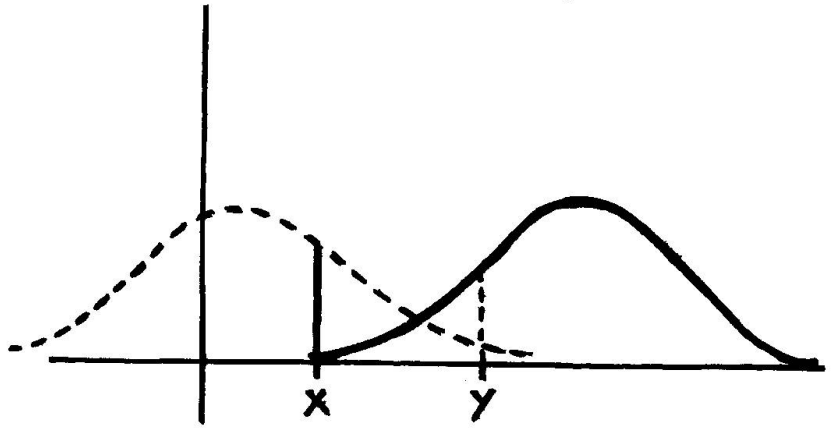


Figure 16

La figure 16 montre que pour une classe d'acier connue ou une fabrication bien définie (courbe pleine), le choix d'un niveau X suffit en contrôle courant, mais qu'il peut être nécessaire, tant qu'un histogramme représentatif d'une telle classe n'est pas connu, de contrôler à un niveau Y supérieur pour exclure les résultats issus d'une population inférieure .

Cette notion de mobilité des critères de contrôle en fonction de la connaissance que l'on a d'une classe d'acier est très importante et conduit en fait à la notion d'agrément préalable éventuel, les conditions de fabrication adoptées pour réaliser les caractéristiques imposées étant alors précisées par le fournisseur.

Dominées par les critères de résilience à basse température, les spécifications d'aciers soudables et en particulier d'aciers soudables à haute limite d'élasticité peuvent dès lors donner lieu à des précisions complémentaires concernant les facteurs permettant l'obtention de tels critères . Nous citerons essentiellement pour les aciers à structure ferrite perlite :

- éléments en solution solide soit d'insertion (azote , carbone) soit de substitution (Mn - Si)
- éléments agissant sur la microstructure (teneur en C et proportion ferrite perlite)
- précipités fins (carbures et nitrures obtenus par addition d'éléments ayant une affinité pour C ou N en particulier Nb et V)
- grosseur du grain ferritique

Nous ne traiterons pas de façon plus détaillée des conditions d'obtention du grain ferritique fin conditionné par la vitesse de refroidissement et la composition chimique, et également par la grosseur du grain d'austénite, mais nous soulignerons que la transformation et la mise en oeuvre des aciers sont dominées par les alternances déformation/recristallisation dans des domaines variés de température qu'il est nécessaire que Sidérurgiste et Utilisateur explorent en commun dans certains cas d'emploi.

XIV - IMPORTANCE des CONDITIONS de TRANSFORMATION ou de TRAITEMENT THERMIQUE :

Le contrôle du niveau de résilience implique, en fait, l'obtention d'un grain ferritique fin . Deux techniques sont généralement utilisées :

- Calmage à l'Aluminium (avec Al résiduel dosable) pour les aciers normalisés, c'est-à-dire recuits au-dessus du point AC_3(généralement AC_3 + 30) , avec refroidissement air.

- Laminage contrôlé(c'est-à-dire dans des conditions de température et de déformation données), technique très utilisée dans des fabrications telles que celles de tubes soudés en aciers semi-calmés ou calmés, en particulier aciers au Niobium .

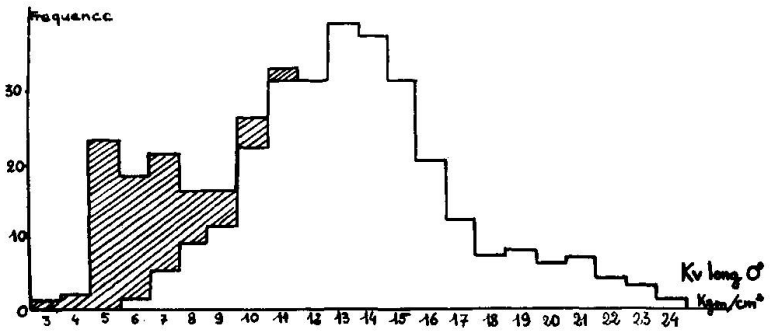


Figure 17

La figure 17 donne pour un ensemble de tôles A 52 pour ponts soudés, la distribution des résiliences Kv long à 0° . On constate que cette distribution comprend deux familles, l'une normale correspondant aux tôles normalisées, l'autre correspondant à des tôles simplement recuites dans un four à passage à la sortie du laminoir .

Les deux familles correspondaient à deux groupes d'exigences différentes :

- Pour la zone non hachurée : Kv long à 0° > 5 Kgm/cm2
- Pour la zone hachurée : Kv long à 0° > 3,5 Kgm/cm2

Pour des exigences supérieures , par exemple Kv long - 20 > 5 Kgm/cm2, le contrôle de l'Aluminium résiduel est nécessaire pour des aciers normalisés .

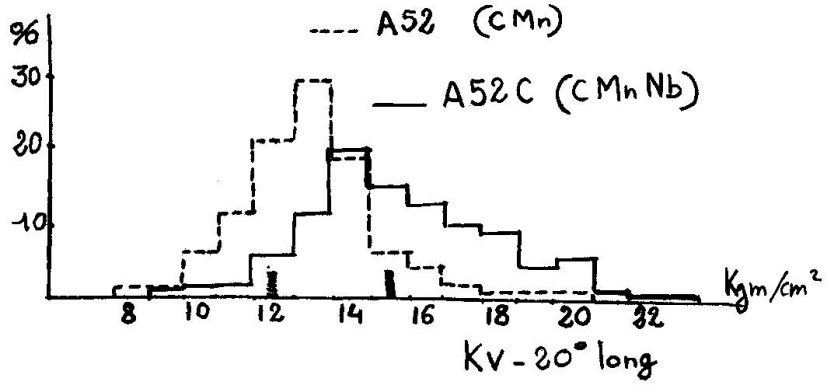


Figure 18

La figure 18 donne les distributions relatives à Kv long - 20 sur deux lots : l'un de 2500T en acier au C - Mn normalisé e 8 à 28 ; l'autre de 1500 T. en acier calmé au Niobium normalisé e 12 à 30

Pour des aciers calmés au Niobium , citons les chiffres suivants obtenus par la technique du laminage contrôlé en épaisseur 12,7 mm :

Kv long - 20°	moyenne	12,9	étendue	6,2/14,8
Kv travers - 20°	moyenne	5,2	étendue	3,5/ 7,4

Signalons enfin que l'obtention de résiliences travers à basse température par exemple Kv travers - 20°C $\geqslant$ 3,5 requiert des conditions adaptées de corroyage (laminage croisé des tôles ou rapports de corroyage long/travers , fonction des formats à réaliser).

XV - COMMENTAIRE GENERAL RELATIF aux TOLES FORTES et aux PROFILES

Si nous nous sommes étendus sur ce chapitre , c'est essentiellement en raison du développement de la construction métallique soudée faisant appel aux tôles, même pour la fabrication de profils reconstitués , souvent plus économiques que les profilés lourds

Dans le domaine des poutrelles laminées, les conditions de laminage , les cadences , l'absence de possibilités de traitement thermique, limitent généralement les exigences au respect de caractéristiques de traction et aux facteurs de forme .

Dans les profilés , il faut tenir compte, comme élément de dispersion , des vitesses de refroidissement différentes entre âme et aile par exemple . Le contrôle des caractéristiques est généralement effectué en long au 1/4 extérieur de la demi aile . Mais, de plus en plus, comme pour les tôles fortes , il est fait appel à des aciers à plus haute limite d'élasticité :

Acier A 7 remplacé par A 36 . E $\geqslant$ 25,2 KG./mm2 aux U.S.A.

Aciers de la classe E 24 et E 36 dans les normes européennes ,

comportant , comme pour les tôles , garanties de résilience à 0° C ou - 20°C , pour utilisation en construction soudée .

XVI - EXEMPLE de DISTRIBUTION RELATIF à une FABRICATION de RONDS à BETON LISSES de la CLASSE Fe E 22 :

La figure 19 est relative à la distribution des valeurs de limites d'élasticité sur un ensemble de 1367 cas .

Il s'agit de la classe Fe E 22 pour laquelle est exigée la garantie E > 22 .

L'histogramme est présenté directement en ordinateur en nombre d'écarts-types . On voit ainsi que cette fabrication satisfait à la condition $\bar{m} - 2\sigma \geqslant 22$ avec $\bar{m}$ 28,88 σ 2,36 .

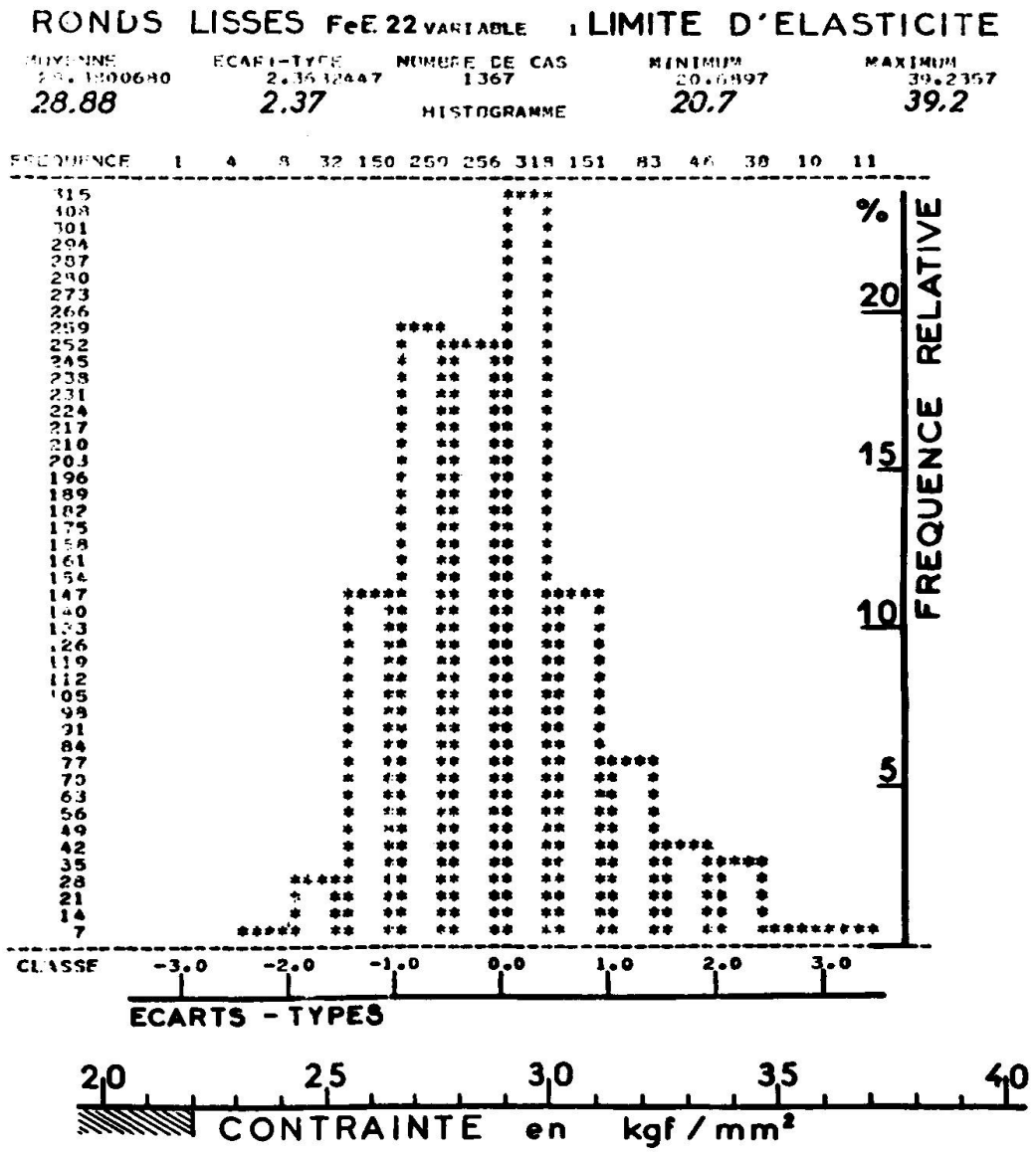


Figure 19

Pour la même population on a :

Pour R m = 40,57 σ = 2,78 la distribution étant également normale

Pour A% m = 37,87 σ = 3,55

Les mises en fabrication tiennent compte de la valeur des dispersions habituellement observées sur la limite d'élasticité. Elles tiennent compte aussi de l'influence des facteurs contrôlables aux différents stades de la fabrication (cf § XIX)

Des limites de surveillance et de contrôle sont fixées pour chaque facteur de façon à garantir un résultat final correct .

XVII - EXEMPLE RELATIF à l'INFLUENCE du DIAMETRE sur les CARACTERISTIQUES de RONDS de la CLASSE E 40 OBTENUS par TORSADAGE à FROID

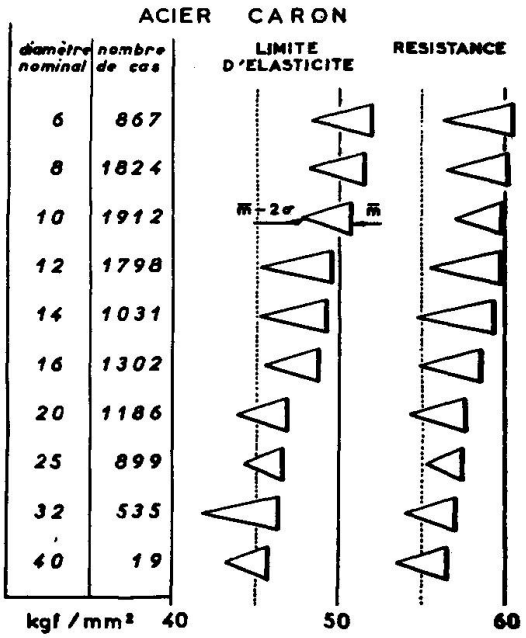


Figure 20

La figure 20 donne pour les diamètres 6 à 40 d'acier du type Caron (acier semi-calmé , laminé en carré puis torsadé avec un pas de 10 diamètres environ) une idée de l'influence du diamètre .

Pour cet acier, il est garanti:

E > 42 Kg/mm2 pour $\emptyset < 20$
40 Kg/mm2 pour $\emptyset > 25$

R > 48,5 Kg/mm2 pour tous diamètres

L'influence du diamètre abaisse pour E : $\bar{m} - 2\sigma$ de 48 à 44 Kg/mm2 quand on passe de 6 à 40 mm. Le graphique situe $\bar{m}$ (base du triangle) et $\bar{m} - 2\sigma$ (pointe du triangle)

XVIII - EXEMPLE d'une FABRICATION d'ACIER ECROUI par TORSADAGE les divers diamètres étant réalisés à partir de divers modes d'élaboration (figure 21)

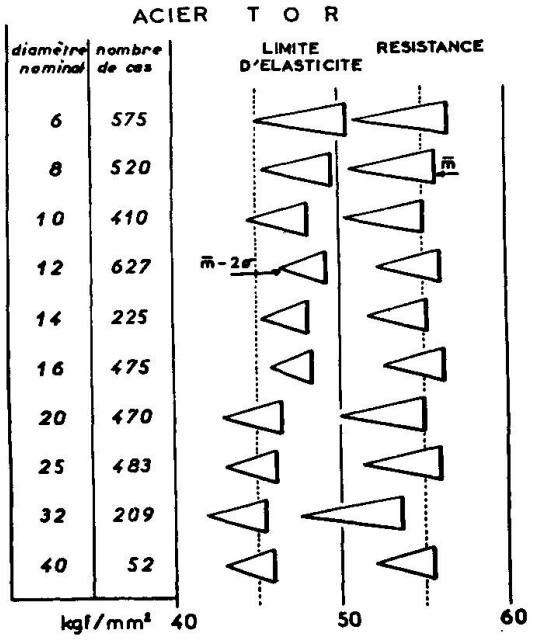


Figure 21

Il s'agit ici d'acier Tor, les petits diamètres $\emptyset \leqslant 10$ comportent des nervures, les diamètres supérieurs des nervures et verrous

L'abaissement de E mais surtout de R est beaucoup moins marqué que pour le groupe d'essais précédent .

Les plus petits diamètres sont issus de lingots effervescents , les diamètres intermédiaires de lingots bloqués . Les diamètres supérieurs sont en acier calmé .

Cet exemple a pour but de souligner l'importance de la connaissance des conditions de fabrication et d'élaboration lorsque l'on veut comparer des aciers répondant aux mêmes exigences .

Les facteurs économiques ne sont pas étrangers au choix de ces conditions, et il serait anormal de demander à un acier autre chose que ce pour quoi il a été fabriqué .

XIX - ORDRE de GRANDEUR des DISPERSIONS et FACTEURS d'INFLUENCE

Prenons l'exemple des aciers pour béton de la classe E 40 obtenus par écrouissage en torsion à partir d'aciers doux .

Les caractéristiques à assurer en traction sont :

$$E \geqslant 42 \text{ Kg/mm2} \qquad \phi \leqslant 20$$
$$R \geqslant 48,5 \text{ "}$$

Pour de tels aciers, l'étendue de la dispersion est en analyse : C 0,07 % - Mn 0,20 %

Comme ordre de grandeur de l'influence de C et Mn sur la résistance , on peut prendre $\Delta R = 50 \Delta[C] + 20 \Delta[Mn]$ (1) ce qui donne $\Delta R = 7,5$. Mais la formule (1) étant valable à ± 2 ΔR passe à 9/10 (tenant compte des facteurs analyse et conditions de laminage et torsadage pour un laminoir donné) .

L'écart relatif entre section réelle et section nominale joue un rôle important puisqu'en matière d'armature pour béton armé, on ne s'intéresse qu'aux contraintes nominales .

La précision du laminage est généralement excellente par rapport aux tolérances règlementaires. La section réelle ne s'écarte pas de la moyenne de plus de 2 à 4 %(figure 22) Mais cela provoque des variations proportionnelles de la valeur des contraintes, d'où un supplément de dispersion de l'ordre de 1,5 à 3 Kg/mm2

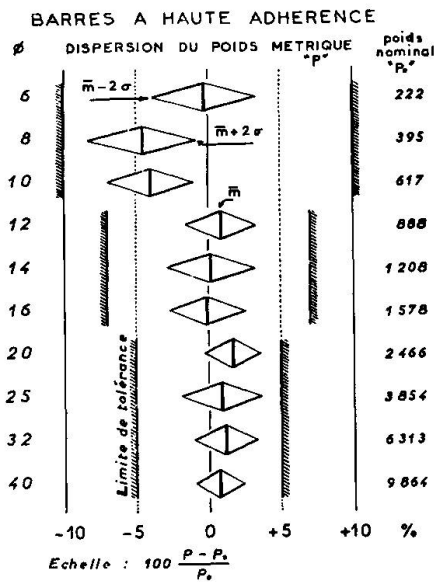


Figure 22

Pour un laminoir et un diamètre donnés, on peut donc estimer l'étendue maximale de la dispersion entre 12 à 13 Kg/mm^2

Pour l'ensemble des diamètres(influence des variations de corroyage et vitesse de refroidissement) cette étendue passe à 15 Kg/mm2 ce qui correspond approximativement à un écart-type moyen de 2,5 Kg/mm2

Les dispersions pour E étant du même ordre que pour R si l'on veut assurer plus de 42 Kg/mm2 pour tous diamètres il faudrait donc viser une valeur moyenne de 48 à 50, mais on peut aussi viser une moyenne plus basse et éliminer au stade Aciérie certaines coulées douces ou affecter les coulées par tranches d'analyses réalisées à des tranches de diamètres .

XX - AUTOCOMPENSATION de DISPERSION DUE au TORSADAGE :

La figure 23 illustre le fait suivant :

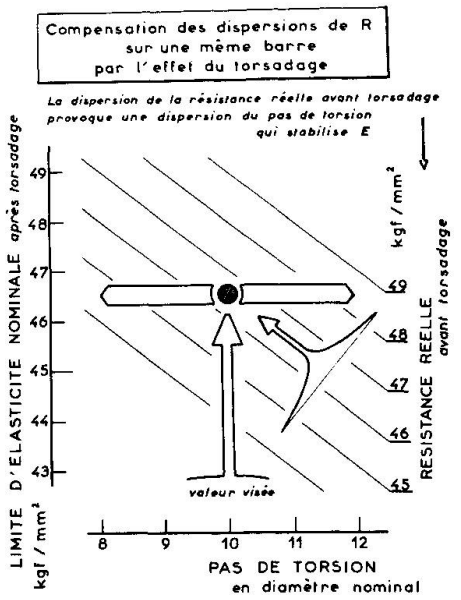


Figure 23

La dispersion de la résistance réelle avant torsadage provoque une dispersion du pas de torsion qui stabilise la limite d'élasticité obtenue par torsadage .

L'acier de résistance moyenne 46,5 torsadé à 10 d prendra une limite d'élasticité de 46,5 en tout point d'une même barre dans laquelle R varie de 44,5 à 48,5 , la variation du pas de torsion étant de l'ordre de 1,5 diamètre pour cette étendue , les parties initialement douces seront plus torsadées que les parties dures .

Le même graphique permet , pour une résistance moyenne donnée, d'évaluer la variation de limite d'élasticité résultant d'une variation du pas de torsion .

XXI - SECURITE des ACIERS pour ARMATURES de PRECONTRAINTE :

Nous ne traiterons pas des caractéristiques mécaniques de ces aciers . Rappelons simplement que chaque lot d'acier pour précontrainte est défini, du point de vue mécanique, en moyenne et écart-type, et que les recommandations pour le calcul des ouvrages précisent les caractères mécaniques à prendre en considération.

Exemple : Recommandations de l'A.S.P. :

- contrainte de rupture : $R_G = R_{mG} - 1,64\sigma_{RG}$
- contrainte d'élasticité : $T_G = T_{mG} - 1,64\sigma_{TG}$

Nous nous limiterons à examiner les défauts préjudiciables à la sécurité et la dégradation des caractéristiques au cours du temps.

XXII - DEFAUTS PREJUDICIABLES à la SECURITE :

Les défauts peuvent apparaitre à diverses étapes de la fabrication .

Pour les éliminer, il existe deux méthodes :

- Contrôler le produit à chaque étape ,
- Faire une étape supplémentaire d'élimination des défauts apparus antérieurement .

L'importance du contrôle ou des réparations est en relation étroite avec la nocivité des défauts considérés.

Nous allons suivre les différentes étapes de la fabrication en examinant succinctement leur influence sur la qualité du produit .

A - Elaboration de l'acier :

On retrouve les problèmes déjà évoqués pour la fabrication des tôles (dispersion de l'analyse, ségrégation) avec cette complication qu'il s'agit toujours d'acier dur ou extra-dur .

Nous n'y reviendrons pas .

B - Laminage des billettes :

Les défauts nettement visibles (grosses criques , pailles , replis) sont faciles à éliminer par rebut ou réparation . Dans le cas où de petits défauts (lignes) seraient préjudiciables, on en facilite la détection par sablage ou magnétoscopie .

Le contrôle par ultra-sons des billettes provenant de la tête du lingot est systématique .

On fait des analyses de contrôle en cas de fourchettes très étroites en Carbone .

C - Laminage du fil machine :

On peut distinguer les défauts de surface (fissures, repliures, etc..) et de forme (côtes , ovalisations), et les défauts de structure (hétérogénéité , tapures) .

La calamine n'est pas, à proprement parler, un défaut mais son état (régularité, adhérence)importe pour les transformations ultérieures .

Les contrôles consistent en mesure du diamètre , écrasement , torsion , micrographie . Il n'y a normalement pas de réparation possible à ce stade mais, comme les échantillons contrôlés ont été prélevés en extrêmité de bobine, un chutage limité est parfois suffisant pour retrouver un fil sain .

On agit efficacement sur la structure par un refroidissement contrôlé du fil .

D - Fabrication du produit fini :

Deux cas sont à envisager :

1°) fils laminés à trempe bainitique ou à trempe martensitique et revenu :

Ces traitements thermiques sont destinés à l'obtention de hautes caractéristiques mécaniques, en rapport avec la structure recherchée . Ils font disparaitre les hétérogénéités initiales de structure .

Le contrôle final comprend les mêmes postes que dans le cas suivant . Le procédé exige qu'il soit très rigoureux .

2°) fils tréfilés et torons :

Cette fabrication comporte plusieurs stades :

a) le patentage est un traitement thermique qui élimine les hétérogénéités de structures et les duretés locales . On fait des micrographies de la structure obtenue (Troostite)

b) le décapage (élimination de la calamine) et la phosphatation (protection contre la rouille) sont suivis d'un étuvage qui supprime la fragilisation par l'hydrogène venant du décapage à l'acide chlorhydrique chaud .

c) le tréfilage améliore les caractéristiques mécaniques et le calibrage . Bien conduit, il ne provoque aucun défaut (éventuellement : rayure , vieillissement par échauffement) .

Comme cette opération est très sévère pour le fil, les défauts internes nocifs provoquent des casses . Ils sont donc éliminés (grosses inclusions, creux, tapures)

d) le dressage n'admet pas non plus de fil fragile . Il peut occasionner des rayures hélicoïdales .

e) le toronnage des fils non dressés agit un peu comme le dressage en raison d'un préfaçonnage par flexion et torsion . Il est sévère pour la fragilité mais deux défauts spécifiques peuvent apparaitre : un mauvais équilibre des tensions entre les fils et la présence de soudures camouflées accidentellement . On peut remédier à cette dernière circonstance par l'emploi de torons de grande longueur sans soudure .

f)La fabrication s'achève par un passage en bain de plomb de 300 à 400°C pour l'élimination des tensions internes . Cette opération prend les noms de détensionnement , vieillissement ou stabilisation . Elle accroit l'allongement , la limite d'élasticité et un peu la résistance . Mais, par contre, elle crée le risque d'un excès de vieillissement avec précipitation de ferrite, nitrures et carbures, notamment aux extrêmités des fils . Les corps gras et savons de tréfilage sont éliminés .

Le contrôle du produit fini reprend tout ce qui a déjà été fait pour le fil machine en vue d'éliminer les défauts qui auraient échappé aux contrôles précédents et ceux qui auraient pu se produire dans les dernières phases de la fabrication . Les fils rayés sont éliminés .

On mesure bien entendu les caractéristiques mécaniques (R, T, A) On procède aux essais de pliage et éventuellement de fatigue , de corrosion, de relaxation suivant les exigences des règles de construction . Les fils aux caractéristiques mauvaises ou trop dispersées sont éliminés .

XXIII - DEGRADATION des CARACTERISTIQUES au COURS du TEMPS :

Pour avoir une sécurité complète quant à la fixation du taux de travail admissible dans un fil pour précontrainte, il faut connaitre la variation dans le temps des caractéristiques mécaniques de ce fil. On dispose pour cela de trois sortes d'essais :

A) Dans l'ESSAI de RELAXATION, on mesure la variation de la charge avec le temps pour une longueur constante du fil . (La réalité est un peu plus complexe car la longueur décroit par suite du retrait du béton) . L'essai se fait en 1000 heures et parfois 10.000 heures . Il donne une idée de la perte de charge moyenne et de sa dispersion .

B) Par l'ESSAI de FATIGUE, on cherche à prévoir l'effet des sollicitations dynamiques en service . Le contrôle porte sur l'absence d'entaille à la surface des fils pour un nombre de cycles donné , ou sur le nombre de cycles supportés jusqu'à la rupture (au delà de 4×10^6 cycles pour des contraintes entre 0,6 et 0,7 R)

C) Les ESSAIS de CORROSION sont d'interprétation délicate . La corrosion provoque soit des piqures soit une fissuration . L'état de surface (rayures) a beaucoup d'importance . La phosphatation constitue une protection intéressante . Le tréfilage augmente la sécurité (orientation et resserrement des joints intergranulaires). Le tréfilé bainitique est plus susceptible à la corrosion . On l'améliore par addition de Si , Cr , Mo .

XXIV - GARANTIE du PRODUCTEUR :

Tout ce qui précède montre que le producteur est parfaitement capable de garantir un produit exempt de défauts nuisibles dont les caractéristiques mécaniques sont bien définies.

En particulier, les tréfilés dressés ou toronnés donnent une grande certitude quant à l'absence de défauts .

Le diagramme effort - élongation est bien connu jusque dans ses dispersions . Il faut cependant reconnaitre qu'il est entaché d'une erreur systématique qui vient de ce que les éprouvettes sont toujours prélevées aux extrêmités des fils . Mais cette erreur elle-même est favorable à la sécurité puisque les prélèvements viennent des zones les moins bonnes (zones de transition, au cours des différentes étapes de fabrication) . La connaissance de ce diagramme permet au fabricant de garantir, soit une moyenne et un écart-type, soit une valeur minimale pour telle ou telle caractéristique d'une qualité définie .

A sa sortie d'usine, le fil pour précontrainte de hautes caractéristiques,tant pour la charge de rupture que pour la ductilité, présente une sécurité entière pour l'utilisateur . Mais ce produit noble est un produit délicat , il faudra continuer à en prendre soin et éviter toute maladresse lors de son emploi, du stockage à l'injection, en passant par la mise en tension .

RÉSUMÉ

Pour divers produits - Tôles fortes et plus particulièrement:

Tôles en aciers soudables à haute limite d'élasticité ($E \geqslant 36$ Kgf/mm^2)

Ronds à béton lisses ($E \geqslant 22$ Kgf/mm^2)

Ronds à béton écrouis par torsion ($E \geqslant 40$ Kgf/mm^2)

Aciers pour fils de précontrainte, divers facteurs de dispersion sont examinés. Outre l'analyse, les conditions de transformation et de refroidissement après laminage ou traitement thermique sont évoquées. Des indications sont données concernant l'influence du mode de désoxydation et de la structure du lingot d'acier.

Les précautions prises pour assurer également un aspect de surface satisfaisant.

Les conditions relatives à l'obtention d'épaisseurs ou de diamètres donnés sont mentionnées (problème de surpoids des tôles, tolérances de diamètre des ronds ou fils).

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Abhandlung wurden neben dicken Blechen insbesondere folgende Artikel untersucht:

- schweissbare Stahlbleche mit hoher Elastizitätsgrenze ($\sigma_f \geqslant 36$ kg/mm^2)
- glatte Armierungseisen ($\sigma_f \geqslant 22$ kg/mm^2)
- kalttordierte Armierungseisen ($\sigma_{0,2} \geqslant 40$ kg/mm^2).

Bei den Vorspanndrähten prüfte man die Ursachen der unterschiedlichen Qualität. Nebst chemisch-physikalischen Untersuchungen wird auf die Bedeutung der Verarbeitungsweise und des Abkühlungsvorganges nach dem Walzen oder der thermischen Behandlung aufmerksam gemacht. Man weist auf den Einfluss der Art und Weise der Desoxydation und der Struktur des Massels hin.

Besondere Bedeutung wird einer gleichmässigen Oberfläche beigemessen.

Es werden die Massnahmen erwähnt, um die gewünschten Dicken und Durchmesser zu erhalten. (Mehrgewicht bei Blechen, Toleranzen der Durchmesser bei Rundeisen und Drähten).

SUMMARY

The variations are discussed for different products - heavy steel plate and in particular:

Weldable steel plate with high elastic limit ($\sigma_y = 51$ ksi)

Round, undeformed concrete reinforcing bars ($\sigma_y = 31$ ksi)

Round concrete reinforcing bars work hardened by torsion (σ_y = 57 ksi)

Steel for prestressing wires, different factors causing variation are examined. In addition to the analysis, the conditions during transformation and cooling after rolling or heat treating are considered. Reference is made to the influence of the method of deoxydation and the structure of the steel ingot.

The precautions taken to insure a satisfactory uniform surface finish.

The conditions which govern the production of specified thicknesses or diameters are mentioned. (The problem of overweight plate, tolerances for the diameter of bars and wire.)